

Kuulojärjestelmän rajoitteet abstraktien sääntöjen muistiedustuksien muodostamisessa

Pro gradu -tutkielma

Lääketieteellinen tiedekunta

Psykologian ja logopedian osasto

Tekijä: Oskari Koskinen

Ohjaaja: Petri Paavilainen

Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
1. Johdanto.....	4
1.1 MMN-vaste.....	4
1.1.1 MMN-vasteen perusominaisuuksia.....	5
1.2 Abstrakti MMN-vaste.....	7
1.2.1 Abstraktin MMN-vasteen perustutkimuksia.....	7
1.2.2 Abstraktin MMN-vasteen ominaisuudet.....	10
1.3 MMN-vasteen teoreettinen tausta ja käytännön merkitys.....	13
1.4 Tutkimusongelmat.....	15
2. Menetelmät.....	16
2.1 Koehenkilöt.....	16
2.2 Kokeen toteutus.....	16
2.3 Jännitevasteiden rekisteröinti.....	20
2.4 Tilastolliset menetelmät.....	21
3. Tulokset.....	21
4. Pohdinta.....	25
4.1 Johtopäätökset.....	25
4.2 Tulosten tulkinnalliset ongelmat.....	29
Lähteet.....	31

Tiivistelmä

Kuulojärjestelmä suorittaa jatkuvasti ääniympäristön valvontaa, joka tapahtuu valikoivan tarkkaavaisuuden suunnasta riippumatta. Oleellinen osa tätä valvontaa on rekisteröidä äänet, jotka ovat joillain tavoilla muista poikkeavia. Poikkeukset voivat olla signaali merkittävästä muutoksesta ympäristössä. Jotta tämän toiminnon suorittaminen olisi mahdollista, on kuulojärjestelmässä oltava hermostollinen mekanismi, joka tallentaa muistiin ennusteen ympäristössä esiintyvistä äänistä. Tässä tutkimuksessa tutkittiin kuulojärjestelmän rajoitteita rekisteröidä ääniä, jotka rikkovat erilaisiin abstrakteihin sääntöihin liittyviä ennusteita.

Mittaukset tehtiin elektroenkefalografialla (EEG). Tulkinta tehtiin mismatch negativity (MMN) -vasteen perusteella. MMN-vastetta pidetään fysiologisesti mitattavana merkinä siitä, että kuulojärjestelmä on onnistuneesti rekisteröinyt ennusteesta poikkeavan äänen. Ärsykkeinä käytettiin kahden siniäänen pareja. Parien äänien korkeudessa oli yhden sävelaskeleen suuruinen ero ylös- tai alaspäin. Parit oli jaettu kahteen virtaan, joita kutsuttiin matalaksi ja korkeaksi. Molempiin virtoihin kuului viisi eri korkuista paria.

Koetilanteita oli yhteensä neljä. Koetilanteet suunniteltiin siten, että ne olisivat teoreettisesti kuulojärjestelmälle asteittain vaikeampia suorittaa. Koetilanteessa A korkean ja matalan virran pareja esitettiin vuorotellen. Poikkeava tapahtuma oli kahden samaan virtaan kuuluvan parin peräkkäin esiintyminen. Koetilanteessa B esitettiin nousevia pareja molemmissa virroista. Poikkeavat parit olivat laskevia. Koetilanteessa C esitettiin korkean virran nousevia pareja ja matalan virran laskevia pareja. Poikkeavat tapahtumat olivat korkeassa virrassa laskevan parin ja matalassa virrassa nousevan parin esiintyminen. Koetilanteessa D esitettiin vuorotellen nousevia ja laskevia pareja. Poikkeavissa tapahtumissa esitettiin samaan suuntaan muuttuva pari kahdesti peräkkäin. Kaikissa koetilanteissa koehenkilö katsoi äänetöntä ja tekstitettyä elokuvaa.

Abstraktia sääntöä rikkovien äänien rekisteröinti onnistui koetilanteessa A, mutta ei koetilanteissa B, C ja D. Jännitevasteiden näönvarainen tulkinta tuki jossain määrin MMN-vasteen esiintymistä kaikissa koetilanteissa. Tilastollisten testien tulokset eivät kuitenkaan olleet merkitseviä lukuun ottamatta koetilanteen A tuloksia, jotka olivat erittäin lähellä tilastollisesti merkitsevää. Tuloksien tilastolliset merkitsevyydet heikkenivät sitä mukaan, kun koetilanteet vaikeutuivat. Oletus koetilanteiden vaikeusjärjestyksestä oli oikea. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan esittää, että kuulojärjestelmä on selvästi rajoittunut kyvyltään rekisteröidä abstrakteja sääntöjä rikkovia ääniä. Tulokset ovat osittain ristiriidassa aikaisemman tutkimuksen kanssa, sillä niissä MMN-vasteita on rekisteröity osin samantapaisissa koetilanteissa.

1. Johdanto

Jokapäiväisessä elämässä erilaisten äänien lähteitä on monesti samanaikaisesti useita. Niistä tulevien äänien ominaisuudet voivat vaihdella. Uusia äänien lähteitä voi ilmestyä. Osa taas voi kadota. Muutos on usein jatkuvaa. Kuulojärjestelmä valvoo jatkuvasti ääniympäristöä. Tämä valvonta tapahtuu automaattisesti, valikoivan tarkkaavaisuuden ulkopuolella. Tämä valvonta on oleellista, koska jotkut uudet ja yllättävät äänet voivat olla signaali oleellisesta muutoksesta ympäristössä. Niiden rekisteröinti ei olisi mahdollista ilman mekanisme, joka tallentaa jollain tavalla muistiin ennusteen siitä, millaisia ääniä ympäristössä todennäköisesti seuraavaksi esiintyy. Lisäksi tämän mekanismin on rekisteröitävä äänet, jotka poikkeavat merkittävästi muistiin tallentuneesta ennusteesta. Kaikki tämä tapahtuu kuulotiedon käsittelyn hyvin varhaisessa vaiheessa, ennen kuin äänet saavuttavat tietoisien havainnon tasoa.

Ympäristön äänien säännöt voivat olla äänen yksinkertaisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten korkeuteen tai voimakkuuteen liittyviä. Ne voivat myös liittyä äänen monimutkaisempiin, abstrakteihin ominaisuuksiin. Esimerkkejä näistä abstrakteista ominaisuuksista ovat puhe ja musiikki. Eri kielissä on usein määritelty lauseen sanoille sanajärjestys, kun taas musiikkikappaleissa eri sävelet seuraavat toisiaan tietyssä järjestyksessä. Verbin esiintyminen väärässä kohtaa lausetta on yksi esimerkki abstraktin säännön rikkoutumisesta. Jonkin tietyn soinnun esiintyminen väärässä kohtaa musiikkikappaletta on toinen.

1.1 MMN-vaste

MMN-vaste (mismatch negativity) on tapahtumasidonnaisen jännitevasteen (event related potential, ERP) komponentti (katsaus: Näätänen ym., 2007). Se on mitattavissa elektroenkefalografialla (EEG). Vaste saadaan esiin esimerkiksi oddball-koeasetelmalla. Tässä paradigmassa esitetään satunnaisesti eri todennäköisyyksillä esiintyviä ääniä jatkuvana virtana. Vähintään yksi ääni on vakioääni, jonka esiintymisen todennäköisyys on suuri. Lisäksi vähintään yksi ääni on poikkeava ääni, jonka esiintymisen todennäköisyys on pieni. Yksinkertaisimmillaan tämä koeasetelma koostuu vain yhdestä vakio- ja poikkeavasta äänestä., jotka toistuvat jatkuvana äänivirtana (...AABAABAAAAA...). Tällöin ennuste on, että jokainen esiintyvä ääni on samanlainen, esimerkiksi korkeudeltaan 1000 Hz. Jokainen ääni, joka poikkeaa aikaisemmin toistuvasti esiintyneestä äänestä, rikkoo tätä ennustetta.

MMN-vastetta muistuttavan ilmiön havaitsivat ensimmäisenä Squires ym. (1975) oddball-kokeessa, jossa oli yksi vakioääni ja poikkeavana äänenä yksi siitä voimakkuudeltaan poikkeava ääni. Poikkeavan äänen jännitevaste oli amplitudiltaan huomattavasti vakioäänien jännitevastetta negatiivisempi aikavälillä 170-250 ms. Vasteelle ei kuitenkaan esitetty tässä tutkimuksessa tulkintaa. Varsinaisen tulkinnan vasteelle esittivät Näätänen ym. (1978).

Näätänen ym. (1978) havaitsivat, että dikootin kuuntelun tehtävässä, jossa koehenkilön piti tunnistaa poikkeavat äänet, sekä tarkkailtuun että ei-tarkkailtuun korvaan esitettyjen poikkeavien äänien jännitevasteista oli havaittavissa amplitudiltaan vakioäänien jännitevasteita selvästi negatiivisempi jännitevaste välillä 150-250 ms. He nimesivät ilmiön MMN-vasteeksi. Koska poikkeavan äänen esittämistä seurasi valikoivan tarkkaavaisuuden suunnasta riippumatta MMN-vaste, tulkittiin MMN-vasteen liittyvän hermoston automaattisiin prosesseihin, jotka erottelevat poikkeavat äänet usein toistuvista äänistä.

1.1.1 MMN-vasteen perusominaisuuksia

Tässä luvussa esitettävät tulokset liittyvät oddball-asetelmalla suoritettuihin kokeisiin, joissa äänien noudattamat säännöt ovat liittyneet niiden yksinkertaisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten korkeuteen ja voimakkuuteen. MMN-vaste, joka on seurausta fysikaalisesti vakioäänestä poikkeavan äänen esittämisestä, on runsaasti tutkittu ilmiö (katsaus: Näätänen ym. 2007). Kaiken tutkimuksen läpikäyntiin ei ole tässä mahdollisuutta. Tässä esitetään yksi näkemys siitä, mitkä tutkimustulokset kuvaavat parhaiten MMN-vasteen keskeisimpiä ominaisuuksia.

Kuten jo Squires ym. (1975) ja Näätänen ym. (1978) havaitsivat, MMN-vaste saavuttaa huippuamplitudinsa noin 150-250 ms poikkeavan äänen esiintymisen jälkeen. MMN-vasteen huippulatenssi on sitä varhaisempi, mitä suurempi poikkeavan ja vakioäänien ero on (ks. esim. Sams ym., 1985). Myös huippuamplitudi kasvaa sitä suuremmaksi, mitä suurempi on vakio- ja poikkeavan äänen fysikaalinen ero (ks. esim. Tiitinen ym., 1994). Kuten tietoisien havainnon tasolla, myöskin kuulojärjestelmän automaattisten toimintojen näyttäisi olevan sitä helpompi rekisteröidä ääni poikkeavaksi, mitä suurempi sen ero on vakioääneen verrattuna. Kun tämä fysikaalinen ero ei ole enää riittävän suuri, myöskään MMN-vastetta ei poikkeavan äänen esittämisen seurauksena enää esiinny (ks. esim. Sams ym., 1985).

MMN-vastetta on tutkittu lukuisilla erilaisilla fysikaalisilla ominaisuuksiltaan vakioäänistä poikkeavilla äänillä. Tähän asti MMN-vaste on esimerkiksi saatu reaktiona äänille, jotka ovat

poikenneet korkeuden ja voimakkuuden (Näätänen ym., 1978), korkeuden muutoksen suunnan (Sams & Näätänen, 1991), äänen keston (Näätänen ym., 1989), esiintymisajankohdan (Ford & Hillyard, 1981) ja tulosuunnan (Paavilainen ym., 1989) perusteella vakioäänistä.

Voimakkaimmillaan MMN-vaste näkyy fronto-sentraalisilla pään pinnan elektrodeilla (ks. esim. Näätänen ym., 1978). MMN-vasteen lähdealueeksi on paikannettu magnetoenkefalografialla (MEG) supratemporaalinen kuuloaivokuori (Hari ym., 1984). Tästä johtuen MMN-vaste kääntää polariteettinsa EEG-tutkimuksissa Sylviuksen uurteen alapuolella, jos vertailuelektrodi on asetettu nenän päähän (Deacon ym., 2000). Tällöin Sylviuksen uurteen alapuolelle sijoitetuista elektrodeista voidaan mitata positiivinen vaste vakioäänestä fysikaalisesti poikkeavalle äänelle. Sylviuksen uurteen yläpuolella sijaitsevilla elektrodeilla MMN-vasteen amplitudi on, nimensä mukaisesti negatiivinen. Tämä on yksi niistä ominaisuuksista, joka erottaa MMN-vasteen muista siihen liittymättömistä, poikkeavan äänen aiheuttamista myöhemmistä jännitevasteiden komponenteista (ks. Näätänen ym., 1982).

Pitkään MMN-vasteen löytämisen jälkeen sen teoreettiset selitysmallit ollettivat (ks. esim. Näätänen, 1990), että sen taustalla olevat kuulojärjestelmän toiminnot olisivat tarkkaavaisuuden suunnasta ainakin lähes täysin riippumattomia. Suurimmassa osassa tutkimuksista (katsaus: Näätänen ym., 2007) ovat MMN-vasteen huippuamplitudi ja -latenssi olleet samanlaiset niin koetilanteessa, jossa koehenkilön tarkkaavaisuus on suunnattu esitettyihin ääniin kuin koetilanteessa, joissa se on suunnattu niistä pois (ks. esim. Sams ym., 1985). Yhtenä osoituksena MMN-vasteen ja tarkkaavaisuuden riippumattomuudesta voidaan pitää myös sitä, että se on mitattavissa joiltain koomassa olevilta potilailta (ks. esim. Rosetti ym., 2014).

MMN:n suhde tarkkaavaisuuteen on kuitenkin ollut kiistanalainen. Joissakin tutkimuksissa on pystytty osoittamaan, että tarkkaavaisuus vaikuttaa jossain määrin MMN-vasteen amplitudiin (katsaus: Sussmann, 2007). Vaikutus tulee esille esimerkiksi kokeissa, joissa ärsykkeet esitetään erittäin nopealla tahdilla. Yksi esimerkki tällaisesta erikoistapauksesta on Woldorff ym. (1998) suorittama koe. He käyttivät dikoottisen kuuntelun tehtävää. Koehenkilö ohjeistettiin tarkkailemaan jompaankumpaan korvaan esitettyjä poikkeavia ääniä. Poikkeava ääni oli voimakkuudeltaan vakioääniä hiljaisempi. Äänien välinen aika vaihteli satunnaisesti 125-315 ms välillä. Ei-tarkkailtuun korvaan esitettyjä poikkeavia ääniä ei tällöin seurannut MMN-vastetta. Koetilanne oli kuitenkin poikkeuksellinen. MMN-vastetta tutkivissa kokeissa harvoin käytetään näin lyhyttä ärsykkeiden välistä aikaa, koska MMN-vaste esiintyy yleensä 150-250 ms poikkeavan ärsykkeen esittämisen jälkeen.

Poikkeavan äänen tietoinen, valikoivan tarkkaavaisuuden alainen havaitseminen taas on mahdollisesti riippuvaista tarkkaavaisuuden ulkopuolella toimivasta mekanismista. Tämä siksi, koska MMN-vaste esiintyy yleisesti ottaen vain sellaisissa koetilanteissa, joissa koehenkilö pystyy käyttäytymisen tasolla erottamaan poikkeavan äänen vakioääniä joukosta (ks. esim. Sams ym., 1985). Kuulojärjestelmän valikoivan tarkkaavaisuuden suunnasta riippumattomat erottelu- ja luokitteluprosessit, joita MMN-vasteen syntyminen heijastaa, saattavat olla edellytys sille, että koehenkilö pystyy käyttäytymisen tasolla raportoimaan, esimerkiksi nappia painamalla, vakioäänistä poikkeavan äänen (ks. esim. Tiitinen ym., 1994).

1.2 Abstrakti MMN-vaste

Äänen poikkeavuuden ei aina tarvitse liittyä äänen fysikaalisiin perusominaisuuksiin, kuten korkeuteen tai voimakkuuteen. Säännöt, joita vakioäänet noudattavat, voivat olla myös abstrakteja. Ensimmäisen tällä ajatuksella toteutetun MMN-kokeen tekivät Nordby ym. (1988). Koe on sopiva havainnollistus siitä, mitä tarkoittaa abstrakti MMN-vaste. Nordby ym. (1988) esittivät koehenkilölle vuorotellen kahta eri ääntä (ABABABA...). Harvakseltaan jompikumpi ääni toistui kahdesti peräkkäin (esim. ABABBABA...). Toistunutta ääntä seurasi MMN-vaste, vaikka se ei tässä tapauksessa ollut fysikaalisesti erilainen edeltävään ääneen verrattuna. Tutkimus osoitti, että kuulojärjestelmä pystyy tallentamaan äänien esitysjärjestykseen liittyvän säännön ja rekisteröimään sitä rikkovat äänet. Tämä on esimerkki niin sanotusta abstraktista MMN-vasteesta.

1.2.1 Abstraktin MMN-vasteen perustutkimuksia

Tässä luvussa esitetään joitakin tärkeimmistä tutkimuksista liittyen abstraktiin MMN-vasteeseen. Koeasetelmia ja tuloksia esitetään yksityiskohtaisemmin kuin aikaisemmassa kappaleessa. Tämä siksi, koska aikaisemmin tehtyjen tutkimuksen yksityiskohtaisemman esittämisen voidaan olettaa helpottavan tässä tehdyn tutkimuksen ymmärtämistä. Tämä tutkimus on jatkumoa aikaisemmin tehdyille tutkimuksille. Jotkin tässä tutkimuksessa käytetyistä koeasetelmista on muokattu aikaisemmin tehdyissä tutkimuksissa käytetyistä koeasetelmista. Tässä esitetyistä tutkimuksista on havaittavissa, että varsinaisten perustutkimuksien jälkeen koeasetelmat ovat muuttuneet monimutkaisemmiksi. Tästä huolimatta abstraktien poikkeamien esittämisestä on seurannut lähes kaikissa tutkimuksissa MMN-vaste (katsaus: Paavilainen, 2013).

Saarinen ym. (1992) tutkivat, pystyykö kuulojärjestelmä rekisteröimään poikkeuksen, joka liittyy äänen korkeuden muutoksen suuntaan liittyvään sääntöön. Ärsykkeet olivat kahden äänen pareja. Parin äänien välissä oli 40 ms hiljaisuus. Parien äänet muodostettiin länsimaisen sävelasteikon askeleiden mukaan väliltä 523-932 Hz. Jokaisen parin korkeus vaihteli satunnaisesti tällä välillä, jolloin paradigmassa ei ollut fysikaalisesti vakiona pysyvää ääntä. Parien äänet esitettiin molempiin korviin. Yhdessä koetilanteessa vakioparit olivat nousevia ja poikkeavat parit olivat laskevia. Nousevissa pareissa jälkimmäinen ääni oli ensimmäistä yhden sävelaskeleen korkeampi (esim. 523-587 Hz), laskevissa pareissa päinvastoin taas matalampi. Koehenkilöiden tarkkaavaisuus ohjattiin pois äänistä. Laskevan parin esiintymistä, eli äänen korkeuden muutoksen suuntaan liittyvän abstraktin säännön rikkoutumista seurasi MMN-vaste. Tutkimus osoitti, että kuulojärjestelmä pystyy muodostamaan ennusteen parien sisäiseen korkeuden muutoksen suuntaan liittyvästä säännöstä ja rekisteröimään poikkeukset.

Paavilainen ym. (1998) muokkasivat Saarinen ym. (1992) koeasetelmaa. He käyttivät ärsykkeinä samalla tavalla laskevia ja nousevia pareja. Koetilanteita oli tutkimuksessa kaksi. Ensimmäinen oli samanlainen kuin Saarinen ym. (1992) tutkimuksessa. Toinen muokattiin siten, että parin äänet esitettiin eri korviin. Riippumatta siitä soitettiinkö parin äänet molempiin vai eri korviin, suunnaltaan vakiopareista poikkeavia pareja seurasi MMN-vaste. Tulos osoittaa, että kuulojärjestelmä pystyy muodostamaan eri korvista tulevista äänistä yhtenäisen ennusteen ja rekisteröimään tätä rikkovat poikkeukset.

Paavilainen ym. (1995) käyttivät ärsykkeinä laskevia ja nousevia äänipareja, joita esitettiin satunnaisessa järjestyksessä vasempaan ja oikeaan korvaan. Vasempaan korvaan esitettyjen parien äänien korkeus vaihteli välillä 523-932 Hz. Oikeaan korvaan esitettyjen parien äänien korkeus vaihteli välillä 1319-2349 Hz. Parien äänten välinen ero oli yksi sävelaskel. Vasempaan korvaan esitetyt vakioparit olivat nousevia ja poikkeavat parit laskevia. Oikeaan korvaan esitetyt vakioparit taas olivat laskevia ja poikkeavat parit nousevia. Koetilanteessa, jossa koehenkilön tarkkaavaisuus ohjattiin pois äänistä, molempiin korviin esitettyjä poikkeavia pareja seurasi MMN-vaste. Tutkimuksen tulos osoittaa, että kuulojärjestelmä pystyy muodostamaan ennusteet myös kahdesta samanaikaisesta, päinvastaista abstraktia sääntöä noudattavasta äänivirrasta ja rekisteröimään molemmissa esiintyvät poikkeavat tapaukset.

Paavilainen ym. (1999) tutkivat, pystyykö kuulojärjestelmä rekisteröimään poikkeuksen ääniparin sisäisen korkeuden muutoksen suhteessa. Pareissa käytetyt äänen korkeudet olivat sävelasteikon askeleiden mukaisia väliltä 523-1661 Hz. Yhdessä koetilanteessa sekä vakio- että poikkeavat parit olivat nousevia. Vakiopareissa ensimmäisen ja toisen äänen välinen korkeusero oli viiden

sävelaskeleen verran. Poikkeavissa pareissa tämä suhde oli joko kaksi, kolme, seitsemän tai kahdeksan sävelaskelta. Koehenkilön tarkkaavaisuus ohjattiin pois äänistä. Poikkeavan parin esittämistä pareja seurasi MMN-vaste. Kuulojärjestelmä pystyy tämän tuloksen perusteella muodostamaan ennusteen siitä, kuinka suuri kahden äänen välisen korkeuseron tulisi olla ja rekisteröimään sellaiset tapaukset, joissa suhde poikkesi tästä.

Myös Tervaniemi ym. (1994) tutkivat, miten kuulojärjestelmä käsittelee äänen korkeuden muutokseen liittyviä sääntöjä rikkovia poikkeavia ääniä. He käyttivät kokeessaan 12 eri korkuista ääntä, jotka muodostettiin sävelasteikon askeleiden mukaan väliltä 311-587 Hz. Äänet esitettiin jatkuvana sarjana siten, että seuraava ääni oli aina edellistä matalampi. Sarja aloitettiin uudestaan, kun matalin ääni oli esitetty (...349-330-311-587-555...). Silloin tällöin satunnaisesti sarjan sääntöä rikottiin kahdella eri tavalla. Yhdessä koetilanteessa esitetty ääni toistui kahdesti peräkkäin (...349-330-330-311...). Toisessa koetilanteessa sarjan seuraava ääni olikin sitä edeltänyttä ääntä korkeampi, jonka jälkeen sarja taas jatkui normaalisti laskevana (...349-330-349-330-311...). Koehenkilöiden tarkkaavaisuus ohjattiin pois äänistä. Sekä toistuneita että edeltänyttä ääntä korkeampia ääniä seurasi MMN-vaste. Tutkimus osoitti, että kuulojärjestelmä pystyy tallentamaan muistiin ennusteen äänen korkeuden jatkuvasta muutoksesta ja rekisteröimään äänet, jotka poikkeavat tästä ennusteesta.

Paavilainen ym. (2001) käyttivät ärsykkeinä yksittäisiä ääniä, joiden kahdella ominaisuudella, korkeudella ja voimakkuudella, oli niitä yhdistävä sääntö: mitä korkeampi ääni, sitä suurempi oli äänen voimakkuus. Poikkeavissa äänissä sääntö oli käänteinen: mitä korkeampi ääni, sitä pienempi äänen voimakkuus. Eri korkeuksien ja voimakkuuksien tasoja oli kumpiakin kahdeksan. Poikkeavia pareja seurasi MMN-vaste. Kuulojärjestelmä pystyy tämän tutkimuksen mukaan muodostamaan kahta äänen ominaisuutta yhdistävän säännön ja rekisteröimään ne tapaukset, jotka rikkovat sääntöä.

Paavilainen ym. (2007) tutkivat, pystyykö kuulojärjestelmä rekisteröimään sääntöä rikkovat äänet tilanteessa, jossa esitetyn äänen pituus ennusti seuraavaksi esitettävän äänen korkeutta. Jokainen esitetty ääni oli 50 % todennäköisyydellä joko pitkä (150 ms) tai lyhyt (100 ms). Pitkää ääntä seurasi korkea ääni (1500 Hz) ja lyhyttä ääntä seurasi matala ääni (1000 Hz). Satunnaisesti silloin tällöin esiintyneissä poikkeavissa äänissä tämä sääntö rikkoutui, kun pitkää ääntä seurasi matala ääni tai lyhyttä ääntä korkea ääni. Molempia sääntöä rikkovista äänistä seurasi MMN-vaste. Kuulojärjestelmä pystyy tämän tuloksen perusteella tallentamaan muistiin ennustemallin, jonka perusteella se voi päätellä tulevien äänien ominaisuuksia edellisten äänien perusteella ja myös rekisteröidä tätä ennustemallia rikkovat äänet.

Koetilanteessa, jossa esitetään vuorotellen nopealla tahdilla kahta ääntä (ABABABA...), joiden korkeuksien ero on suuri, syntyy vaikutelma kahdesta erillisestä, korkeasta ja matalasta äänivirrasta. Tätä ilmiötä kutsutaan äänivirtojen eriytymiseksi (stream segregation; Darwin, 1997). Jos esitystahti sen sijaan on hidas, koetaan vain yksi äänivirta, jossa kaksi ääntä vuorottelee. Kuulojärjestelmä osaa tehdä tämän jaon myös valikoivan tarkkaavaisuuden suunnasta riippumatta, koska sekä korkean että matalan virran sääntöjä rikkovien äänien esittämisestä seurasi MMN-vaste (Sussmann ym., 1998).

Paavilainen ym. (2018) muokkasivat Paavilaisen ym. (1995) koeasetelmaa siten, että korkean ja matalan äänivirran pareja esitettiin vuorotellen kuulokkeiden kautta molempiin korviin. Yhdessä koetilanteessa sekä matalan että korkean virran vakioparit olivat nousevia ja poikkeavat parit laskevia. Toisessa korkean virran vakioparit olivat laskevia ja poikkeavat nousevia. Matalassa virrassa sääntö oli käänteinen. Näissä kahdessa koetilanteessa molempien virtojen parit esitettiin niin nopealla tahdilla, että ne voitiin havaita kahtena erillisenä, matalana ja korkeana virtana. Kolmas koetilanne oli muuten samanlainen kuin toinen, mutta parit esitettiin siinä määrin hitaasti, että äänivirtojen eriytymistä ei tapahtunut. Kaikkia abstraktia sääntöä rikkovia poikkeavia pareja seurasi MMN-vaste kaikissa koetilanteissa. Kokeen tulos osoitti, että kuulojärjestelmä pystyy rekisteröimään abstraktia sääntöä rikkovat äänet kahdesta erillisestä virrasta ja myös silloin, kun eri virtojen säännöt olivat keskenään vastakkaiset. Kokeen tulos osoitti myös, että äänivirtojen eriytymisellä ei ole merkitystä MMN:n syntymiselle. Kuulojärjestelmä pystyi rekisteröimään poikkeavat parit äänien esitystahdista riippumatta.

1.2.2 Abstraktin MMN-vasteen ominaisuudet

Vaikka abstrakti MMN-vaste (katsaus: Paavilainen, 2013) on huomattavasti vähemmän tutkittu ilmiö kuin fysikaalisen poikkeaman rekisteröinnistä seuraava MMN-vaste (katsaus: Näätänen ym., 2007), saatavilla olevan tiedon perusteella näyttää siltä, että abstrakti MMN-vaste poikkeaa joiltain ominaisuuksiltaan fysikaalisen poikkeaman rekisteröinnistä seuraavasta MMN-vasteesta. Näin ollen on myös mahdollista, että niiden hermostolliset mekanismit ovat joiltain osin erilaiset.

On esimerkiksi viitteitä siitä, että vaikka abstrakteja sääntöjä rikkovat äänet suunniteltaisiin helpommaksi kuulojärjestelmän rekisteröidä, ei tällä ole vaikutusta MMN-vasteen huippuamplitudiin tai -latenssiin toisin kuin fysikaalisten poikkeamien kohdalla (vrt. esim. Sams ym., 1985). Tämän osoittaminen on kuitenkin ongelmallista, koska abstrakteja sääntöjä rikkovat ärsykkeet ovat huomattavasti hankalampi suunnitella noudattamaan eri vaikeuden tasoja. Eri vaikeuden tasoja ei voida määritellä yksiselitteisillä kriteereillä, kuten esimerkiksi laskennallisella

erolla eri äänien voimakkuuden tai korkeuden välillä. On kuitenkin tehty muutamia tutkimuksia (Paavilainen ym., 2003; Carral ym., 2005), joissa on yritetty suunnitella ja toteuttaa vaikeudeltaan eri tasoisia abstrakteja poikkeamia ja vertailla niiden esittämisestä seuranneita MMN-vasteita.

Paavilainen ym. (2003) tutkivat, miten kuulojärjestelmä käsittelee tilanteen, jossa ääni rikkoo useampaa kuin yhtä abstraktia sääntöä. He käyttivät ärsykkeinä äänipareja, joissa jokaisen parin sisällä tapahtui joko korkeuden, voimakkuuden tai molempien muutos. Pareja oli kaikissa kolmessa kategoriassa useita erilaisia. Koetilanteita oli kolme. Ensimmäisessä koetilanteessa vakioparit olivat korkeudeltaan nousevia ja poikkeavat parit olivat korkeudeltaan laskevia. Toisessa koetilanteessa vakioparit olivat voimakkuudeltaan nousevia ja poikkeavat parit olivat voimakkuudeltaan laskevia. Kolmannessa koetilanteessa vakioparit olivat sekä korkeudeltaan että voimakkuudeltaan nousevia ja poikkeavat parit olivat sekä korkeudeltaan että voimakkuudeltaan laskevia ("kaksoispoikkeama"). Kaikissa koetilanteissa esiintyi MMN-vaste, mutta kaksoispoikkeamasta seurannut MMN-vaste ei eronnut amplitudinsa tai huippulatenssinsa perusteella muita poikkeamia seuranneista MMN-vasteista. Tulos viittaa siihen, että kuulojärjestelmä käsittelee äänivirran abstraktia sääntöä rikkovat äänet kategorisesti, toisin kuin fysikaalisesti poikkeavan äänen tapauksessa (ks. esim. Tiitinen ym., 1994).

Carral ym. (2005) käyttivät myös kokeessaan kahden äänen pareja. Vakioparit olivat kaikissa koetilanteissa "muuttumattomia" (molempien äänien korkeus oli sama). Poikkeavissa pareissa parin äänillä oli eroa joko kahden, neljän, kuuden tai kahdeksan askeleen (askeleet olivat saman suuruisia) verran ylös tai alas korkeudessa. Kaikkia korkeuden muuttumattomuuden sääntöä rikkovia pareja seurasi MMN-vaste, mutta näiden MMN-vasteiden amplitudien tai huippulatenssien välillä ei ollut merkittävää eroa. Tämän kokeen tuloksen perusteella voidaan myös esittää, että abstraktia sääntöä rikkovien äänien käsittely kuulojärjestelmässä on kategorista, ts. taustalla oleva neuraalinen mekanismi toimisi kaikki tai ei mitään -logiikalla.

Kun sääntöjä rikkovat äänet ovat jollain yksinkertaisella, fysikaalisella tavalla vakioäänistä poikkeavia, on MMN-vasteen taustalla olevien hermostollisten mekanismien tekemä onnistunut erottelu mahdollisesti edellytys sille, että koehenkilö pystyy tunnistamaan esimerkiksi nappia painamalla arvaustodennäköisyyttä paremmin poikkeavat äänet (ks. esim. Sams ym., 1985). Sama ei näytä aina pätevän abstraktilla tavalla poikkeavien äänien tapauksessa. Esimerkiksi Paavilaisen ym. (2007) kokeessa oli kaksi tarkkailutilannetta, joista ensimmäisessä koehenkilöt eivät tienneet äänen noudattamia sääntöjä mutta heitä ohjeistettiin painamaan nappia minkä tahansa oudolta tai poikkeavalta kuulostavan äänen kohdalla. Toisessa koetilanteessa ääniin liittyvät abstraktit säännöt selitettiin heille ennen napinpainallustehtävää. Koehenkilöt suoriutuivat molemmissa tilanteissa

varsin heikosti (10,9 % ja 14,6 % poikkeavista äänistä löydettiin). Ääniin liittyvien sääntöjen kertominen ei siis juurikaan parantunut tulosta. Tästä huolimatta poikkeavia ääniä seurasi molemmissa tilanteissa varsin selvä MMN-vaste. Tämän perusteella näyttäisi siis siltä, että abstraktien poikkeamien tapauksessa se, että aivot rekisteröivät esitietoisesti jonkun äänen abstraktia sääntöä rikkovaksi, ei ole välttämättä yhteydessä siihen, että koehenkilö pystyisi tietoisesti tunnistamaan tämän äänen poikkeavaksi. Tämän voidaan tulkita tukevan tulkintaa, jonka mukaan fysikaalisia ja abstrakteja poikkeamia käsittelevät ainakin osittain erilliset hermostolliset mekanismit.

Kuten aikaisemmin esitetyt tutkimukset osoittavat, pystyy kuulojärjestelmä MMN-vasteen perusteella oppimaan abstrakteja sääntöjä, valikoivan tarkkaavaisuuden suunnasta riippumatta. Se pystyy myös rekisteröimään näitä sääntöjä rikkovat poikkeukset, vaikka niiden tunnistaminen ei olisikaan valikoivan tarkkaavaisuuden alaisesti mahdollista. Tämän perusteella on mahdollista esittää, että äänivirran abstraktia sääntöä rikkovaa ääntä seuraava MMN-vaste heijastaa jonkinlaista ”primitiivistä sensorista älykkyyttä” (ks. Näätänen ym., 2001), joka ei ole suurimman osan ajasta tietoisesta tarkkaavaisuudesta käytettävissä.

Tällainen primitiivinen sensorinen älykkyys saattaa kuitenkin olla yhteydessä myös korkeamman asteiseen älykkyyteen. Houlihan ym. (2012) käyttivät samaa koeasetelmaa ja ärsykeitä kuin Paavilainen ym. (2001). He mittasivat koehenkilöiden sanallista ja suoritussykkyyttä MAB (Multidimensional Aptitude Battery) -testillä, joka on Weschlerin kognitiivisen kyvykkyyden testin kaltainen testi. Lisäksi he käyttivät Zahlen-Verbindungs Testiä (ZVT), joka on Trail making -testin kaltainen kognitiivisen prosessointinopeuden testi. Heidän tulostensa mukaan korkeat pisteet kognitiivisen kyvykkyyden testeissä olivat yhteydessä myös suuriin MMN-vasteen amplitudeihin. De Pascalis ym. (2014) käyttivät kognitiivisen kyvykkyyden mittaamiseen Ravenin matriiseja (Raven's Advanced Progressive Matrices). Heidän tulostensa mukaan suuret pisteet Ravenin matriiseissa olivat niin ikään yhteydessä suuriin MMN-vasteen amplitudeihin. Näiden tulosten perusteella näyttäisi siltä, että abstrakti MMN-vaste on yhteydessä myös korkeamman tasoiseen kognitiiviseen kyvykkyyteen.

Valitettavasti tutkimuksia, joissa koehenkilöt opettelisivat harjoittelemalla tunnistamaan abstraktia sääntöä rikkovat poikkeavat äänet, on tehty hyvin vähän. Yhden tutkimuksen (Tervaniemi ym., 2001) verran on näyttöä siitä, että harjoittelu parantaa joidenkin koehenkilöiden kykyä tunnistaa abstraktia sääntöä rikkovat äänet. On siis mahdollista, että abstraktien poikkeamien tarkkaavaisuuden alainen havaitseminen vaatii harjoittelua, toisin kuin fysikaalisten poikkeamien, joka onnistuu koehenkilöiltä ilman harjoittelua, jos vain vakio ja poikkeavan äänen fysikaalinen

ero on riittävän suuri. Siinä missä erotuskynnys rajoittaa kuulojärjestelmän kykyä erottaa fysikaalisesti vakioäänistä poikkeava ääni, on mahdollista, että kuulojärjestelmän kyky erottaa abstraktia sääntöä rikkova ääni riippuu abstraktin säännön monimutkaisuudesta ja harjoittelun määrästä.

Yhden tutkimuksen verran on näyttöä siitä, että on mahdollista muodostaa abstrakti sääntö, joka on siinä määrin monimutkainen, että kuulojärjestelmä ei enää kykene tuottamaan MMN-vastetta reaktiona tätä sääntöä rikkoville äänille. Tervaniemi ym. (2001) käyttivät ärsykkeinä useita eri korkuisia viiden äänen sarjoja. Vakiosarjan neljässä ensimmäisessä äänessä jokainen ääni oli edellistä korkeampi, mutta sarjan viides ääni oli neljättä ääntä matalampi (esim. ABCDC). Poikkeavissa sarjoissa lasku tapahtui jossain muussa kohdassa (esim. ABCAB). Yhdessä koetilanteessa koehenkilöt eivät olleet tietoisia sarjan säännöstä. Tässä koetilanteessa poikkeavan sarjan esittämisestä ei seurannut MMN-vastetta. Tutkimus osoitti, että MMN-vasteen taustalla olevan mekanismin kyky löytää säännönmukaisuuksia on selvästi rajallinen.

1.3 MMN-vasteen teoreettinen tausta ja käytännön merkitys

MMN-vaste on osoitus siitä, että on olemassa hermostollinen mekanismi, joka pystyy jollain tavalla erottelemaan usein toistuvista äänistä poikkeavat, harvoin esiintyvät äänet. MMN-vasteen taustalla olevalle hermostolliselle mekanismille onkin esitetty useita, osittain toistensa kanssa ristiriitaisia teoreettisia malleja. Varhaisin näistä teoreettisista malleista oli sensorisen muistijäljen teoria (Näätänen, 1990). Teorian mukaan kuulojärjestelmä tallentaa muistiin sensorisia muistijälkiä ääniympäristön usein toistuvien äänien yksinkertaisista fysikaalisista ominaisuuksista, kuten korkeudesta ja voimakkuudesta. Jokaisen uuden äänen esiintymisen jälkeen kuulojärjestelmä vertailee sen fysikaalisia ominaisuuksia sensorisiin muistijälkiin tallennettujen äänien fysikaalisiin ominaisuuksiin. Jos uusi ääni ei vastaa fysikaalisilta ominaisuuksiltaan mitään muistissa olevaa ääntä, seurauksena on MMN-vaste.

Vaihtoehtoiseksi teoreettiseksi selitysmalliksi MMN-vasteelle on esitetty neuraalisen adaptaation malli (May ym., 1999). Tämän mallin mukaan MMN-vasteen taustalla ei ole muistijälkeä, vaan kyseessä on huomattavasti yksinkertaisempi hermostollinen mekanismi. Kuuloaivokuori on järjestäytynyt tonotooppisesti. Hermosolujoukot, jotka reagoivat 1000 Hz ääniin ovat lähellä hermosolujoukkoja, jotka reagoivat 1100 Hz ääniin, mutta kaukana joukoista, jotka reagoivat 1500 Hz ääniin. Kun esimerkiksi 1000 Hz ääntä esitetään toistuvasti, adaptoituvat sekä 1000 Hz ääneen vastaavat, että niiden viereiset hermosolujoukot. Seurauksena näiden hermosolujoukkojen

tuottamien vasteiden suuruus pienenee. Jos taas 1000 Hz äänien väliin ilmestyy 1500 Hz ääni, saadaan sille suurempi vaste kuin toistuneille 1000 Hz äänille, koska 1500 Hz ääneen vastaavat hermosolujoukot ja niiden naapurit eivät ole ehtineet adaptoitumaan. Teoria on siten vaihtoehto sensorisen muistijäljen teorialle (katsaus: Fishman, 2014).

Molempia teorioita tarkastellessa on otettava huomioon myös historiallinen tilanne. Ennen vuotta 1988 tehty MMN-vasteeseen liittyvät tutkimukset oli toteutettu koeasetelmilla, joissa harvinaiset poikkeavat äänet olivat vakioääniin verrattuna poikkeavia vain yksinkertaisten fysikaalisten ominaisuuksiensa, kuten korkeuden tai voimakkuuden, perusteella. Tätä taustaa vasten on hyvin ymmärrettävissä, miksi myös MMN-vastetta on yritetty teoreettisesti selittää malleilla, jotka perustuvat äänen fysikaalisiin ominaisuuksiin.

Sekä sensorisen muistijäljen että neuraalisen adaptaation teoria eivät välttämättä pysty selittämään esimerkiksi aikaisemmin esitettyä Nordby ym. (1988) tulosta. Nordby ym. (1988) kokeessa ei ollut varsinaisia harvinaisia poikkeavia ääniä, vaan poikkeava tapahtuma, jonka esiintymisestä seurasi MMN-vaste, oli kahden saman äänen esiintyminen peräkkäin (ABABABBA...). Sensorisen muistijäljen teoria ei pysty selittämään tulosta, koska molemmat esitetyistä äänistä olivat yhtä todennäköisesti tallennettuna sensoriseen muistiin, jolloin kumpikaan niistä ei ollut millään tavoin uusi tai erityinen. Myöskään neuraalisen adaptaation teoria ei pysty selittämään tulosta, koska hermosto luultavasti ehtii adaptoitumaan molempiin ääniin, jolloin niille syntyy suurin piirtein saman vahvuinen hermostollinen vaste. Koska toistuva ääni oli lisäksi täsmälleen samanlainen kuin sitä edeltänyt ääni, pitäisi toistuvasta äänestä seuraavan vasteen olla adaptaation seurauksena erityisen pieni.

Nordbyn ym. (1988) ja vastaavien tulosten (katsaus: Paavilainen, 2013) selittämiseksi tarvitaan teoria, joka ei rajoitu tarkastelemaan pelkästään äänen yksinkertaisia fysikaalisia ominaisuuksia, kuten korkeutta tai voimakkuutta. Säännönmukaisuuksien muistiedustuksien teoriassa (Winkler, 2007) ääniympäristön äänien yksinkertaiset fysikaaliset ominaisuudet ovat vain yksi erikoistapaus. Teorian mukaan kuulojärjestelmä tallentaa muistiin ennustemallin eri äänien noudattamista säännöistä. Jokaista uutta ääntä verrataan ennustemallin tekemään ennusteeseen. MMN-vaste on teorian mukaan seurausta ennusteesta selvästi poikkeavan äänen rekisteröinnistä. Esimerkiksi Nordby ym. (1988) tapauksessa ennuste olisi seuraava: ääntä A seuraa ääni B ja ääntä B seuraa ääni A (sääntö: ABABABABA...). Yksinkertainen oddball-koeasetelma, jossa on yksi vakio ja poikkeava ääni (AAABAA...) taas voitaisiin ilmaista muodossa: jokaista ääntä A seuraa ääni A. Teoria on Näätäsen (1990) esittämän sensorisen muistijäljen teorian laajennos. Se ei kumoa sitä, vaan täydentää sitä.

MMN-vasteen taustalla olevien hermostollisten mekanismien toiminnan ymmärtäminen on oleellista, koska useissa tutkimuksissa on osoitettu, että MMN-vaste on yhteydessä esimerkiksi useisiin psykologian ja psykiatrian kannalta oleellisiin muuttujiin. MMN-vaste on yhteydessä esimerkiksi työmuistiin (Bonetti ym., 2018), päättely- ja ongelmanratkaisukykyyn (Pascalis ym., 2014), masennukseen (Bonetti ym., 2017), kaksisuuntaiseen mielialahäiriöön (Hermens ym., 2018), impulsiivisuuteen (Franken ym., 2005), post-traumaattiseen stressihäiriöön (Ge ym., 2011), psykoosin oireisiin (Koshiyama ym., 2018) ja eteneviin hermostoa rappeuttaviin muistisairauksiin sekä lievään kognitiiviseen heikentymiseen (Stothart ym., 2014). Vaikka mekanismeja MMN-vasteen taustalla ei täysin ymmärretä, voidaan todeta, että se on selvästi yhteydessä hermoston terveyteen ja toimintakykyyn. Onkin esitetty (katsaus: Näätänen, 2000), että MMN-vastetta tulisi hyödyntää enemmän kliinisissä sovelluksissa.

1.4 Tutkimusongelmat

Tässä tutkimuksessa käytetään edellä esitettyjen ääniparikokeiden (vrt. Saarinen ym., 1992) muunnosta. Parit jaetaan korkeiden ja matalien parien virtoihin (vrt. Paavilainen ym., 1995, 2018). Koetilanteita on neljä. Ne on suunniteltu teoreettisesti asteittain vaikeutuviksi. Järjestys ei perustu suoraan mihinkään aikaisempaan tutkimukseen. Tarkoitus on löytää koetilanne, jossa poikkeavan äänen esittämistä ei enää seuraa MMN-vaste, eli sääntöä rikkovan äänen rekisteröinti epäonnistuu.

Koetilanteessa A (kuva 1) esitetään vuorotellen matalan ja korkean virran pareja. Poikkeava tapahtuma on kahden samaan virtaan kuuluvan parin peräkkäin esiintyminen (vrt. Nordby ym., 1988). MMN-vasteen esiintymisen edellytykset ovat, että kuulojärjestelmä pystyy jakamaan parit kahteen eri virtaan, löytämään säännön, jonka mukaan korkean ja matalan virran parit esiintyvät vuorotellen ja rekisteröimään poikkeuksen, kun kaksi samaan virtaan kuuluvaa paria esiintyy peräkkäin.

Koetilanteessa B (kuva 2) esitetään molempien virtojen pareja satunnaisessa järjestyksessä. Jokainen vakiopari on virrasta riippumatta nouseva. Poikkeavat parit ovat laskevia (vrt. Paavilainen ym., 2018). MMN-vasteen esiintymisen edellytykset ovat, että kuulojärjestelmä pystyy rekisteröimään, että parin sisäisen korkeusmuutoksen suunta on oleellinen osa sääntöä, suurin osa pareista on nousevia ja harvinaiset laskevat parit ovat sääntöä rikkovia poikkeuksia.

Koetilanteessa C (kuva 3) esitetään molempien virtojen pareja satunnaisessa järjestyksessä. Korkean virran vakioparit ovat nousevia ja matalan virran vakioparit ovat laskevia. Poikkeavat parit

ovat korkeassa virrassa laskevia ja matalassa virrassa nousevia (vrt. Paavilainen ym., 2018). MMN-vasteen esiintymisen edellytykset ovat, että kuulojärjestelmä pystyy jakamaan parit kahteen eri virtaan, rekisteröimään, että parin sisäisen korkeusmuutoksen suunta on oleellinen osa sääntöä, että korkean virran vakioparit ovat nousevia ja matalan laskevia ja että laskevat parit korkeassa virrassa sekä nousevat parit matalassa ovat sääntöä rikkovia poikkeuksia.

Koetilanteessa D (kuva 4) esitetään vuorotellen nousevia ja laskevia pareja molemmista virroista. Poikkeava tapahtuma on samaan suuntaan muuttuvan parin esiintyminen kahdesti peräkkäin. MMN-vasteen esiintymisen edellytykset ovat, että kuulojärjestelmä pystyy rekisteröimään, että parin sisäinen muutos on oleellinen osa sääntöä, että nousevia ja laskevia pareja esitetään vuorotellen, ja että poikkeava tapahtuma on kahden samaan suuntaan muuttuvan parin esiintyminen peräkkäin.

2. Menetelmät

2.1. Koehenkilöt

Kokeeseen osallistui yhteensä 12 koehenkilöä (11 naista, 1 mies: iät 19-45 vuotta). Koehenkilöistä 8 oli yliopisto-opiskelijoita tai suorittanut vähintään maisterin tutkinnon. Kaikki koehenkilöt olivat oikeakätisiä. Kaikilla koehenkilöillä oli normaali kuulo. Koehenkilöistä yhdelläkään ei ollut tiedossa olevia psykiatrisia tai neurologisia sairauksia. Koehenkilöistä kaksi soitti jotain musiikki-instrumenttia aktiivisesti. Jokainen koehenkilö antoi kirjallisen suostumuksen kokeeseen ennen kokeen toteuttamista. Koe suoritettiin Helsingin julistuksen tutkimuseettisten periaatteiden mukaisesti.

2.2 Kokeen toteutus

Kokeessa käytettiin ärsykkeinä kahden puhtaan siniäänen muodostamia pareja. Parien molempien äänien pituus oli 50 ms. Parien molemmissa äänissä oli 5 ms nousu- ja laskuajat. Parien äänien välissä oli 30 ms hiljaisuus. Parien pituus oli siten yhteensä 130 ms. Esitettyjen parien välissä oli 170 ms hiljaisuus. Kokeessa oli pareja kahdelta eri korkeusalueelta, joita kutsutaan tässä matalaksi (220-392 Hz) ja korkeaksi (1319-2349 Hz) virraksi. Parien äänien välinen korkeusero oli yhden sävelaskeleen verran. Kumpaankin virtaan kului viisi eri korkuista paria. Parien äänien korkeudet on esitetty taulukossa 1.

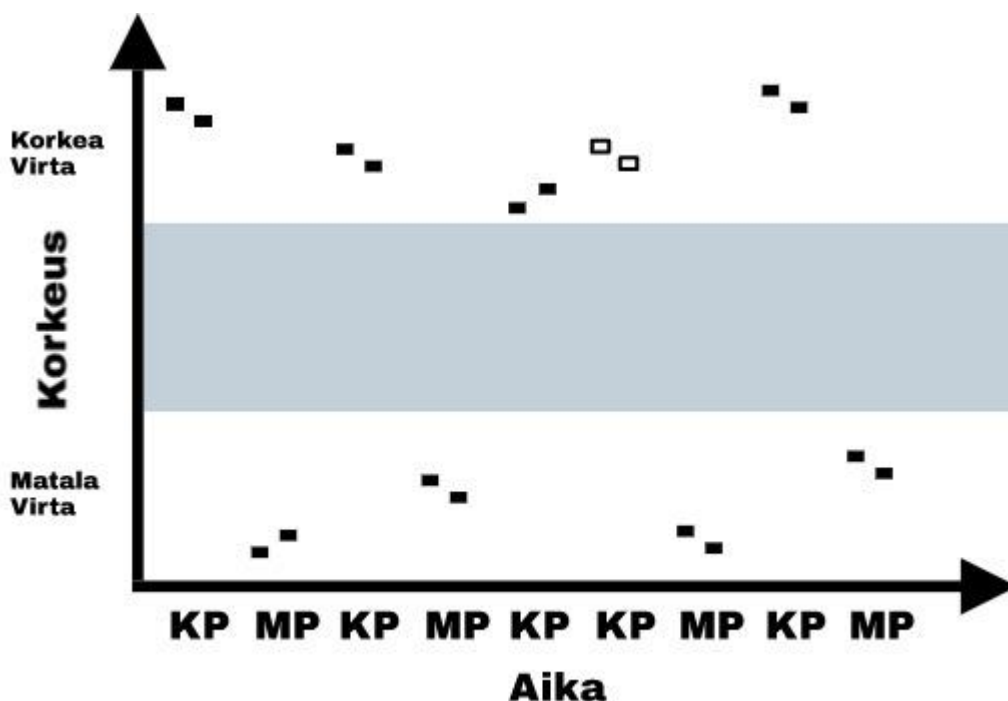
Matala virta	Korkea virta
220, 247	1319, 1480
247, 277	1480, 1661
277, 311	1661, 1865
311, 349	1865, 2093
349, 392	2093, 2349

Taulukko 1: Matalalla ja korkealla taajuusalueella käytettyjen ääniparien äänten taajuudet.

Koetilanteen mukaan parien äänet saatettiin myös esittää eri järjestyksessä, kuin mitä tässä taulukossa esitetään.

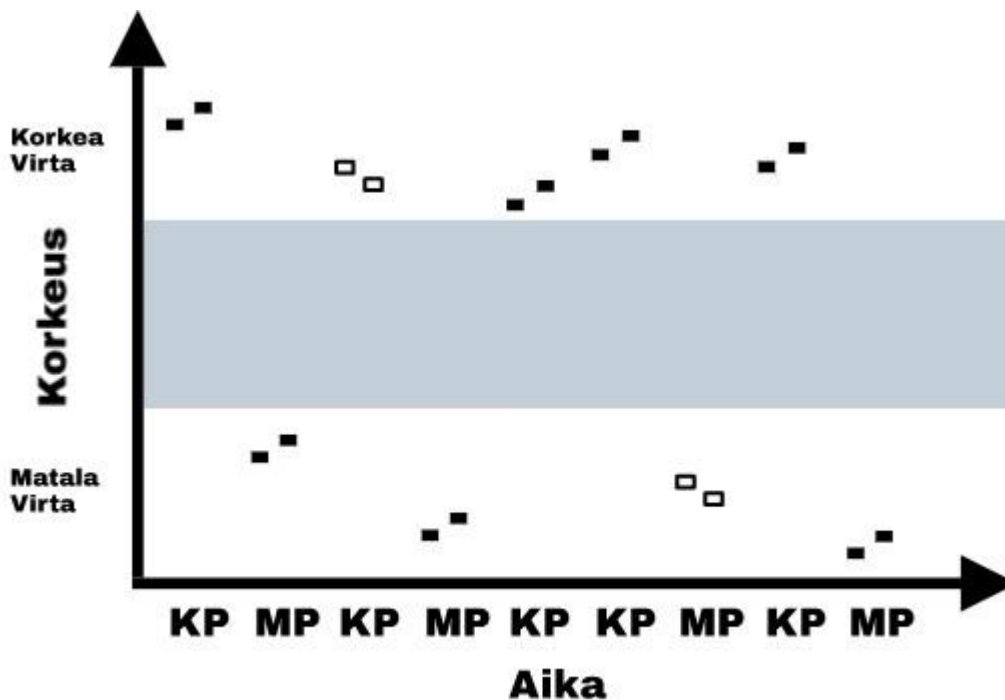
Koe koostui neljästä koetilanteesta. Koetilanteessa A (kuva 1) esitettiin vuorotellen matalasta ja korkeasta virrasta satunnaisesti valittuja pareja. Poikkeava tapahtuma oli samaan virtaan kuuluvan parin esiintyminen kahdesti peräkkäin. Poikkeavan tapahtuman todennäköisyys on 10 %.

Fysikaalisesti täsmälleen sama korkean tai matalan virran pari ei kuitenkaan voinut esiintyä kahdesti peräkkäin.



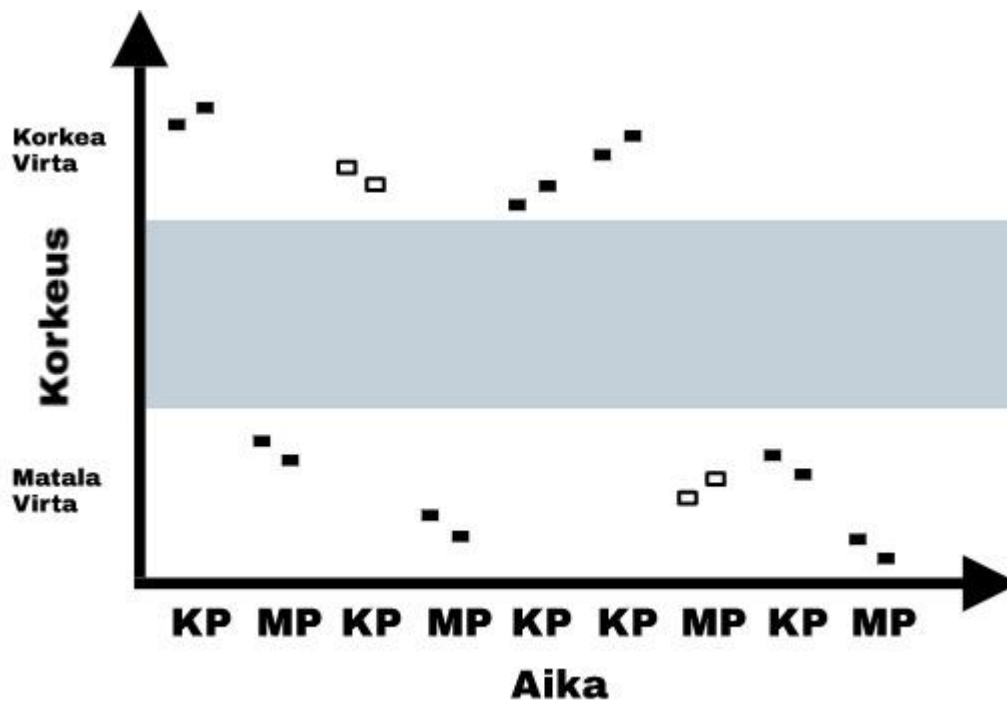
Kuva 1: Koetilanteessa A esitettiin vuorotellen pareja matalasta ja korkeasta virrasta. Poikkeava tapahtuma (valkoinen pari) oli saman virran parin toistuminen. KP = korkean virran pari, MP = matalan virran pari. Harmaa palkki kuvaa virtoja erottavaa aluetta, jolla ei esitetty lainkaan pareja.

Koetilanteessa B (kuva 2) esitettiin satunnaisessa järjestyksessä pareja korkeasta ja matalasta virrasta. Täsmälleen sama pari ei kuitenkaan voinut esiintyä kahdesti peräkkäin. Vakioparit olivat molemmissa virroissa nousevia. Pari oli 45 %:n todennäköisyydellä nouseva korkean virran pari, 45 %:n todennäköisyydellä nouseva matalan virran pari, 5 %:n todennäköisyydellä laskeva korkean virran pari ja 5 %:n todennäköisyydellä laskeva matalan virran pari. Poikkeava tapahtuma oli siten laskevan parin esiintyminen jommassa kummassa virrassa.



Kuva 2: Koetilanteessa B korkean ja matalan virran pareista suurin osa oli nousevia. Harvinainen poikkeava tapahtuma (valkoiset parit) oli laskevan parin esiintyminen jommassakummassa virrassa.

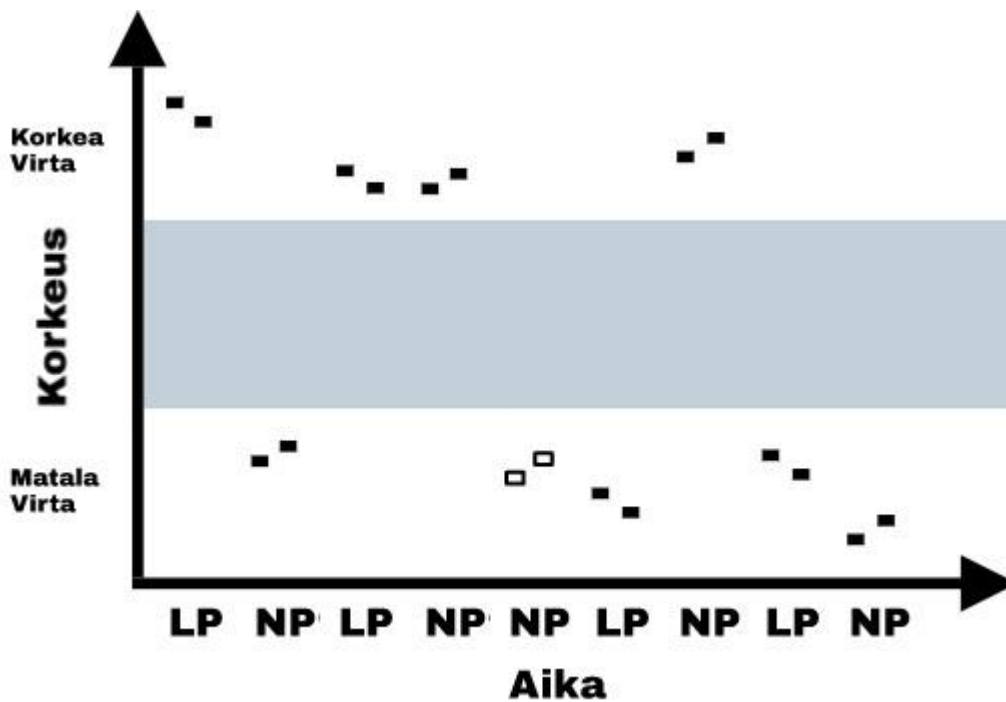
Koetilanteessa C (kuva 3) esitettiin satunnaisessa järjestyksessä pareja korkeasta ja matalasta virrasta. Täsmälleen sama pari ei kuitenkaan voinut esiintyä kahdesti peräkkäin. Vakioparit olivat korkeassa virrassa nousevia ja matalassa laskevia. Pari oli 45 %:n todennäköisyydellä nouseva korkean virran pari, 45 %:n todennäköisyydellä laskeva matalan virran pari, 5 %:n todennäköisyydellä laskeva korkean virran pari ja 5 %:n todennäköisyydellä nouseva matalan virran pari. Poikkeavat tapahtumat olivat laskevan parin esiintyminen korkeassa virrassa tai nousevan parin esiintyminen matalassa virrassa.



Kuva 3: Koetilanteessa C korkean virran vakioparit olivat nousevia ja matalan virran vakioparit laskevia. Poikkeavat parit olivat korkeassa virrassa laskevia ja matalassa nousevia (valkoiset parit).

Koetilanteessa D (kuva 4) esitettiin vuorotellen korkeasta ja matalasta virrasta satunnaisesti valittuja nousevia ja laskevia pareja. Poikkeava tapahtuma oli kahden samansuuntaisen parin esiintyminen kahdesti peräkkäin. Toistuva samaan suuntaan muuttuva pari ei kuitenkaan voinut olla fyysikaalisesti täsmälleen sama pari kuin sitä edeltänyt pari. Poikkeavan tapahtuman todennäköisyys oli 10 %.

Ääniparit esitettiin kuulokkeiden kautta molempiin korviin. Koehenkilö sai itse säätää äänenvoimakkuuden miellyttävälle tasolle. Koehenkilöt istuivat kokeen ajan mahdollisimman mukavasti nojatuolissa, joka oli sijoitettu akustisesti ja sähköisesti eristettyyn huoneeseen. Koehenkilöt ohjeistettiin välttämään liiallista silmien räpyttelyä ja lihasten jännittämistä, sekä pitämään silmät auki koko kokeen ajan. Koko kokeen ajan koehenkilöt katsoivat itse valitsemaansa äänetöntä ja tekstitettyä elokuvaa. Koehenkilöt ohjeistettiin olemaan kiinnittämättä esitettyihin ääniin mitään huomiota. Koehenkilöille ei kerrottu ennen koetta mitään kokeen tutkimusongelmista, koetilanteista tai kokeessa käytetyistä ärsykkeistä. Tämä siksi, koska tutkimuksen tarkoitus oli tutkia valikoivan tarkkaavaisuuden suunnasta riippumattomia kuulojärjestelmän toimintoja. Jokaisen koetilanteen esitysjärjestys satunnaistettiin jokaiselle koehenkilölle erikseen. Jokaisella koetilanteella oli pituutta 20 minuuttia. Jokainen koetilanne esitettiin kahdessa kymmenen minuutin osassa. Kokeen kokonaiskesto oli 80 minuuttia.



Kuva 4: Koetilanteessa D laskevia ja nousevia pareja esitettiin vuorotellen. LP = laskeva pari, NP = nouseva pari. Poikkeava tapahtuma oli samansuuntaisen parin esiintyminen kahdesti peräkkäin (valkoinen pari).

2.3 Jännitevasteiden rekisteröinti

EEG-signaali rekisteröitiin jatkuvana. Läpäisykaista oli 0,1-40 Hz. Rekisteröintiin käytettiin kymmentä Ag/AgCl-elektrodia, jotka olivat Fpz, Fz, Cz, Pz, F3, F4, vasen (LM) ja oikea mastoidielektrodi (RM) sekä horisontaalinen (HEOG) ja vertikaalinen (VEOG) silmänliikkeiden kontrollielektrodi. Vertailuelektrodi oli asetettu nenän päähän ja maadoituselektrodi otsaan. EEG leikattiin 400 ms:n mittaisiksi jaksoiksi, jotka alkoivat 100 ms ennen parin ensimmäisen äänen alkua ja päättyivät 300 ms sen alun jälkeen. Yli $\pm 100 \mu V$:n suuruisia jännitemuutoksia sisältäneet jaksot poistettiin. Tämä siksi, koska näin suuret jännitemuutokset eivät ole seurausta aivoissa tapahtuvasta sähköisestä toiminnasta, vaan johtuvat silmänliikkeistä tai lihasjännityksestä.

Jännitevasteet keskiarvostettiin erikseen jokaisen koetilanteen korkean sekä matalan virran vakio- ja poikkeaville pareille ja suodatettiin 1-30 Hz läpäisykaistalla. Koetilanteen A jännitevasteiden perustaso oli -80-0 ms, koska tässä koetilanteessa kuulojärjestelmä pystyy periaatteessa välittömästi parin ensimmäisen äänen alkaessa erottelemaan, onko kyseessä vakio vai poikkeava pari. Koetilanteiden B, C ja D perustaso taas oli 0-80 ms, koska näissä koetilanteissa parin rekisteröinti vakioksi tai poikkeavaksi oli mahdollista aikaisintaan, kun parin toisen äänen esitys alkoi.

Jokaisessa koetilanteessa esitettiin molemmista virroista yhteensä 3600 vakioparia ja 400 poikkeavaa paria. Jokaisen koehenkilön keskiarvoistettuihin jännitevasteisiin summattiin vähintään 2500 vakioparia ja 250 poikkeavaa paria molemmista virroista yhteensä.

2.4 Tilastolliset menetelmät

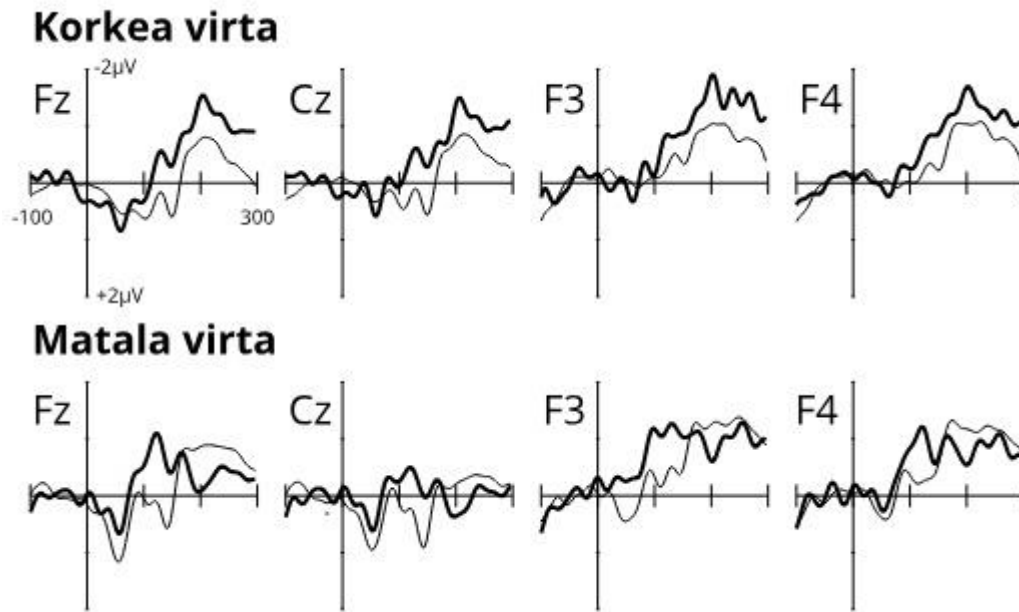
Tilastolliset analyysit suoritettiin IBM SPSS -ohjelmiston versiolla 25. Aiempien tutkimusten tulosten perusteella koetilanteen A vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteiden keskiarvoamplitudin laskentaväliksi määriteltiin 100-200 ms ja koetilanteiden B, C ja D 150-250 ms. Koetilanteen A jännitevasteiden keskiarvoamplitudien laskentaväli oli muita koetilanteita varhaisempi, koska kuulojärjestelmä pystyi rekisteröimään parin poikkeavaksi jo ensimmäisen esitetyn äänen perusteella kun taas koetilanteissa B, C ja D vasta toisen äänen perusteella. Näinollen myös mahdollisten MMN-vasteiden oletettiin olevan A-tilanteessa esiintymislatenssiltaan muita tilanteita aikaisempia.

Jokaisen koetilanteen keskiarvoamplitudeille suoritettiin erikseen kolmisuuntainen toistettujen mittausten varianssianalyysi. Suuntina käytettiin parin tyyppiä (vakio tai poikkeava), virran korkeutta (matala tai korkea) ja elektrodia (Fz, Cz, F3, F4). Elektrodeiksi valittiin nämä neljä, koska aikaisemman tutkimuksen (katsaus: Näätänen ym., 2007) perusteella MMN-vaste näkyy lähinnä frontaalisisilla ja sentraalisilla elektrodeilla. Greenhouse-Geisser -korjauksia käytettiin, jos sfäärisyyssehto ei toteutunut. Parittaiset vertailut suoritettiin yksisuuntaisilla parittaisilla t-testeillä. Tilastollisen merkitsevyyden rajana käytettiin yleisesti hyväksyttyä rajaa ($p < 0,05$).

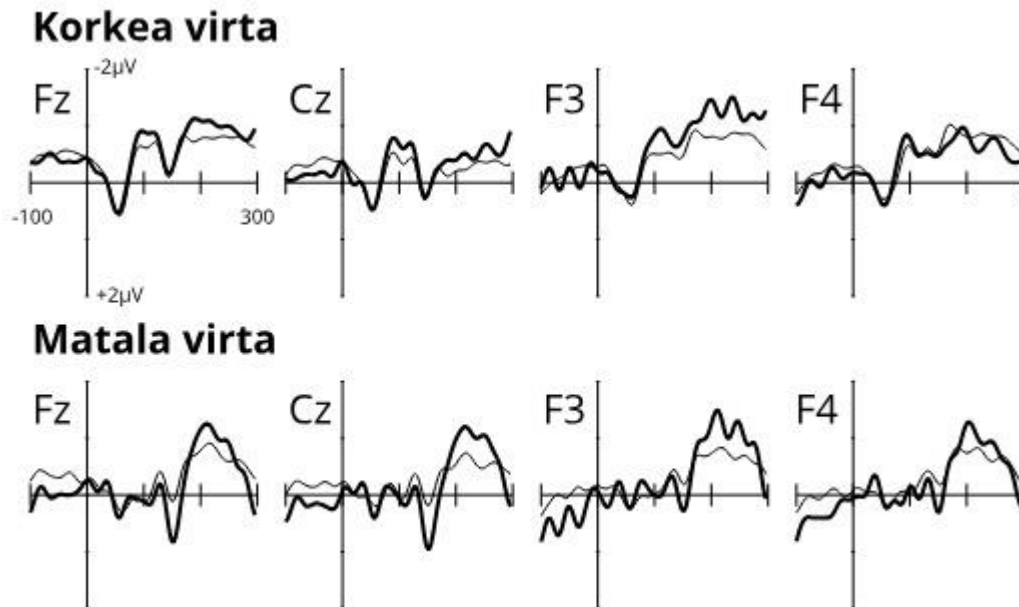
3. Tulokset

Kuvissa 5-8 on esitetty koetilanteiden A, B, C ja D yli kaikkien koehenkilöiden keskiarvostetut jännitevasteet korkean ja matalan virran vakio- ja poikkeaville pareille. Visuaalisen tarkastelun perusteella koetilanteen A (kuva 5) molempien virtojen poikkeavien parien jännitevasteet ovat aikavälillä 100-200 ms selvästi negatiivisempia kuin vakioparien, mikä viittaa MMN-vasteeseen. Koetilanteen B (kuva 6) molempien virtojen poikkeavien parien jännitevasteet ovat aikavälillä 150-250 ms negatiivisempia kuin vakioparien, joka myös viittaa MMN-vasteeseen. Koetilanteen C (kuva 7) korkean virran poikkeavien parien jännitevaste on aikavälillä 150-250 ms negatiivisempi kuin poikkeavien parien. Matalassa virrassa vastaavaa, MMN-vasteeseen viittaavaa eroa ei kuitenkaan näy. Koetilanteen D (kuva 8) matalan virran poikkeavien parien jännitevaste on

aikavälillä 150-250 ms negatiivisempi kuin poikkeavien parien, mutta korkeassa virrassa vastaavaa eroa ei näy.

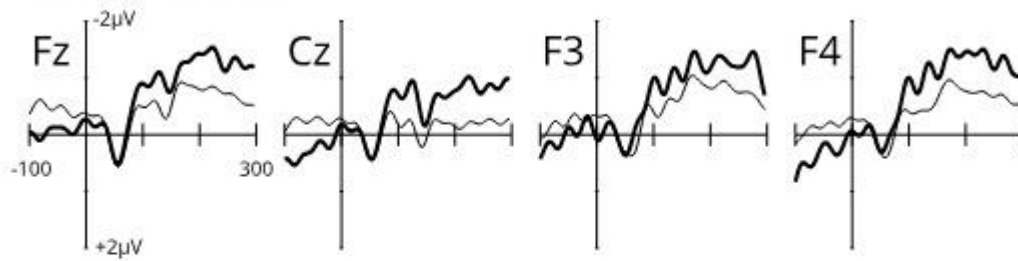


Kuva 5: Vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteet koetilanteesta A. Paksu käyrä on poikkeavien parien ja ohut vakioparien jännitevaste.

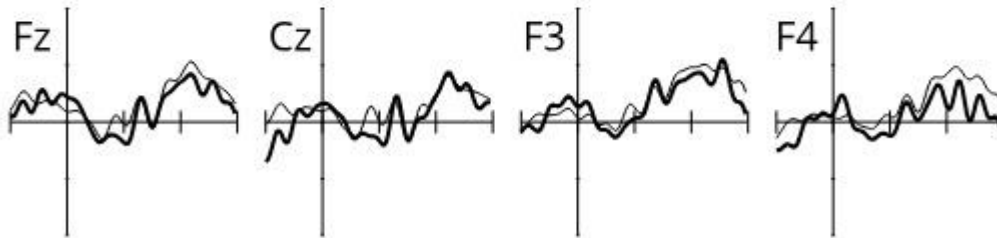


Kuva 6: Vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteet koetilanteesta B. Paksu käyrä on poikkeavien parien ja ohut vakioparien jännitevaste.

Korkea virta

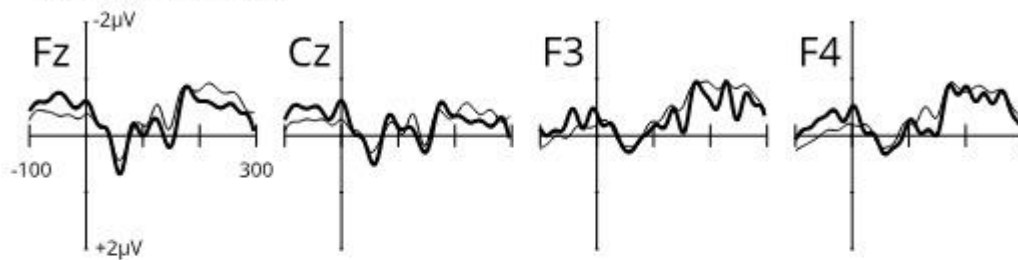


Matala virta

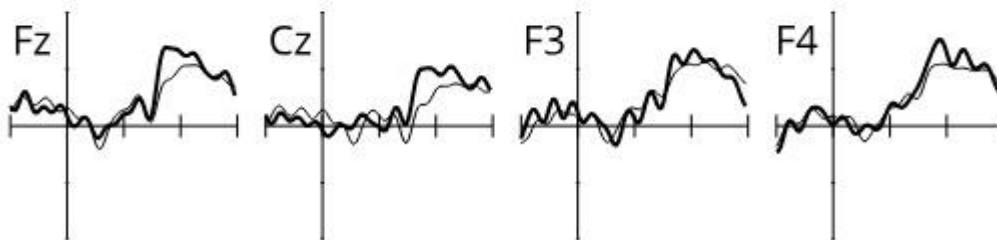


Kuva 7: Vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteet koetilanteesta C. Paksu käyrä on poikkeavien parien ja ohut vakioparien jännitevaste.

Korkea virta



Matala virta



Kuva 8: Vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteet koetilanteesta D. Paksu käyrä on poikkeavien parien ja ohut vakioparien jännitevaste.

Jännitevasteiden keskiarvoamplitudit				
Koetilanne ja elektrodi	Matalan virran vakioparit	Matalan virran poikkeava parit	Korkean virran vakioparit	Korkean virran poikkeava parit
A Fz	-0,195	-0,594	0,057	-0,568
A Cz	0,210	-0,126	0,015	-0,549
A F3	-0,727	-1,060	-0,533	-0,998
A F4	-0,718	-0,866	-0,483	-0,923
B Fz	-0,593	-0,624	-0,725	-0,915
B Cz	-0,426	-0,517	-0,196	-0,341
B F3	-0,629	-0,890	-0,796	-1,212
B F4	-0,636	-0,754	-0,839	-0,712
C Fz	-0,675	-0,518	-0,797	-1,275
C Cz	-0,373	-0,348	-0,171	-0,720
C F3	-0,843	-0,695	-0,878	-1,237
C F4	-0,724	-0,354	-0,783	-1,357
D Fz	-0,833	-1,123	-0,748	-0,519
D Cz	-0,468	-0,849	-0,358	-0,274
D F3	-0,972	-1,094	-0,839	-0,598
D F4	-0,956	-1,184	-0,775	-0,648

Taulukko 1: Kaikkien koetilanteiden jännitevasteiden keskiarvoamplitudit matalan ja korkean virran vakio- ja poikkeaville pareille.

Koetilantessa A elektrodin päävaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,669;18,363} = 10,788$; $p = 0,001$). Virralla ei ollut tilastollisesti merkitsevää päävaikutusta ($F_{1,11} = 0,003$; $p = 0,960$). Parin tyyppin päävaikutus oli lähellä tilastollista merkitsevyyttä ($F_{1,11} = 3,329$; $p = 0,095$). Korkean virran vakio- ja poikkeavien parien keskiarvoamplitudien erotuksista tilastollisesti merkitseviä olivat elektrodeilta Fz ($t_{11} = 2,733$; $p = 0,010$), Cz ($t_{11} = 2,832$; $p = 0,008$) ja F3 ($t_{11} = 2,114$; $p = 0,029$) mitatut vasteet. Matalan virran vakio- ja poikkeavien parien keskiarvoamplitudien erotuksista mikään ei ollut tilastollisesti merkitsevä.

Koetilanteessa B elektrodin päävaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,668;18,352} = 8,055$; $p = 0,04$). Virralla ei ollut tilastollisesti merkitsevää päävaikutusta ($F_{1,11} = 0,164$; $p = 0,693$). Parin tyyppin päävaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,11} = 0,978$; $p = 0,344$). Parittaisista vertailuista ei saatu tilastollisesti merkitseviä tuloksia.

Koetilanteessa C elektrodin päävaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,433;15,758} = 6,061$; $p = 0,017$). Virralla ei ollut tilastollisesti merkitsevää päävaikutusta ($F_{1,11} = 1,824$; $p = 0,204$). Parin tyypin päävaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,11} = 0,523$; $p = 0,485$). Parittaisista vertailuista korkean virran vakio- ja poikkeavien parien keskiarvoamplitudien erotus oli tilastollisesti merkitsevä elektrodeilla Fz ($t_{11} = 1,951$; $p = 0,039$) ja F4 ($t_{11} = 2,037$; $p = 0,033$) mitattuna.

Koetilanteessa D elektrodin päävaikutus oli tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,762;19,379} = 11,988$; $p = 0,001$). Virralla ei ollut tilastollisesti merkitsevää päävaikutusta ($F_{1,11} = 3,638$; $p = 0,083$). Parin tyypin päävaikutus ei ollut tilastollisesti merkitsevä ($F_{1,11} = 0,061$; $p = 0,810$). Parittaisista vertailuista matalan virran vakio- ja poikkeavien parien keskiarvoamplitudien erotus oli tilastollisesti lähellä merkitsevää elektrodilta Cz ($t_{11} = 2,091$; $p = 0,061$) mitattuna.

4. Pohdinta

Tässä tutkimuksessa tutkittiin kuulojärjestelmän kykyä rekisteröidä abstrakteja sääntöjä rikkovia ääniä, neljässä oletetusti asteittain vaikeutuvassa koetilanteessa. Koetilanteiden järjestys ei perustunut aikaisempaan tutkimukseen. Tarkoitus oli tutkia, kuinka monimutkaisten abstraktien sääntöjen poikkeamia kuulojärjestelmä onnistuu rekisteröimään ja löytää mahdollisesti koetilanne, jossa tämä ei enää onnistu, eli MMN-vastetta ei seuraa poikkeavan äänen esittämisestä.

4.1 Johtopäätökset

Koetilanne A oli osittainen toisto Nordby ym. (1988) kokeesta, mutta kahden äänen sijaan koehenkilölle esitettiin vuorotellen satunnaisesti valikoituja korkean ja matalan virran pareja. Poikkeava tapahtuma oli, kun kaksi samaan virtaan kuuluvaa paria esitettiin peräkkäin. Tässä koetilanteessa MMN-vasteen syntymisen edellytys oli, että kuulojärjestelmän piti pystyä jakamaan parit kahteen eri virtaan, korkeaan ja matalaan, löytää sääntö, jonka mukaan korkeita ja matalia pareja esitettiin vuorotellen, sekä rekisteröidä poikkeavat tapahtumat, jolloin samaan virtaan kuuluva pari esiintyi kaksi kertaa peräkkäin. Parin tyypin päävaikutus, parittaiset vertailut ja jännitevasteet (kuva 5) viittaavat siihen, että poikkeavan parin esittämistä seurasi MMN-vaste. Väärän johtopäätöksen riski ei ole tässä kohtuuton, koska parin tyypin päävaikutus on erittäin lähellä tilastollisesti merkitsevää MMN-vasteen esiintymisen perusteella voidaan esittää, että kuulojärjestelmä pystyy suorittamaan koetilanteen A vaatimat tehtävät.

Koetilanne B muokattiin Paavilaisen ym. (2018) suorittamasta koetilanteesta, jossa esitettiin vuorotellen satunnaisesti valittuja korkean ja matalan virran pareja. Sekä korkean että matalan virran vakioparit olivat nousevia ja poikkeavat laskevia. Koetilannetta muutettiin siten, että eri virtojen pareja ei soitettu vuorotellen, vaan satunnaisessa järjestyksessä. Tästä seurasi se, että tietoisien havainnon tasolla ei tapahtunut äänivirtojen eriytymistä. MMN-vasteen syntymisen edellytyksenä oli, että kuulojärjestelmä pystyy rekisteröimään, että parin sisäinen muutos on oleellinen osa sääntöä, että suurin osa pareista oli nousevia ja poikkeavat parit olivat laskevia.

Koska parin tyyppin päävaikutus jäi kauas tilastollisesti merkitsevästä, ovat jännitevasteista (kuva 6) havaittavissa olevat MMN-vasteelta näyttävät vasteet mahdollisesti vain satunnaisia löydöksiä. Siksi esitetään, että poikkeavan parin esittämisestä ei seurannut MMN-vastetta. Tässä koetilanteessa kuulojärjestelmä ei siis pystynyt varmuudella enää rekisteröimään poikkeavia laskevia pareja nousevien vakioparien joukosta.

Tämän tutkimuksen tulos on ristiriidassa Paavilainen ym. (2018) tuloksen kanssa. Tulos on jossain määrin yllättävä, sillä ainoa ero Paavilaisen ym. (2018) kokeeseen oli se, että tässä kokeessa eri virtoihin kuuluvia pareja ei esitetty vuorotellen vaan satunnaisessa järjestyksessä. Tämä tulos on myös ristiriidassa useiden aikaisempien tutkimusten (ks. esim. Saarinen ym., 1992; Paavilainen ym., 1995) kanssa, joissa koetilanteelle B varsin pitkälle analogisissa koeasetelmissa selkeä MMN-vaste on saatu esiin.

Tulosten ristiriitaisuus voisi selittyä kahdella asialla. Ensinnäkin otoskoko oli tässä tutkimuksessa mahdollisesti liian pieni tai eri äänivirtojen parien satunnaisessa järjestyksessä esiintyminen (mikä estää havainnon tasolla kahdeksi virraksi eriytymistä), tekee koetilanteesta kuulojärjestelmälle liian vaikean suorittaa. Syy tuskin on otoskoossa. Vakio ja poikkeavien parien keskiarvojen erotus (taulukko 1) oli siinä määrin pieni, että tulosten saaminen tilastollisesti merkitseväksi vaatisi usean kymmenen koehenkilön lisäämistä otokseen. Pienemmilläkin otoksilla on aiemmissa tutkimuksissa saatu tilastollisesti merkitseviä tuloksia.

Myös koetilanne C muokattiin Paavilaisen ym. (2018) koetilanteesta, jossa esitettiin vuorotellen satunnaisesti valikoituja korkean ja matalan virran pareja. Tällöin äänet eriytyivät myös havainnon tasolla kahdeksi erilliseksi virraksi. Koetilannetta muutettiin tässä tutkimuksessa koetilanteen B tavoin siten, että eri virtojen parit esitettiin satunnaisessa järjestyksessä, jolloin eriytymistä ei samassa määrin koettu. Korkean virran vakioparit olivat nousevia ja poikkeavat parit laskevia. Matalassa virrassa säännöt olivat käänteiset (Paavilaisen ym., 2018 tutkimuksessa korkean ja matalan virran säännöt olivat päinvastoin).

Koetilanteessa C MMN-vasteen syntymisen edellytys oli, että kuulojärjestelmä pystyy jakamaan parit kahteen eri virtaan ja rekisteröimään parin muutossuunnan oleelliseksi osaksi sääntöä. Lisäksi kuulojärjestelmän oli rekisteröitävä, että eri korkuisissa virroissa oli voimassa käänteiset säännöt. Lopuksi oli vielä rekisteröitävä parit, jotka rikkoivat muutoksen suuntaan liittyvää sääntöä siinä virrassa, johon kukin esitetty äänipari kuului.

MMN-vasteen esiintymisestä oli havaittavissa jännitevasteissa (kuva 7) ja parittaisissa vertailuissa jonkin verran viitteitä. Kokonaisuutena arvioiden tämä näyttö ei ole riittävää, koska parin tyypin päävaikutus jäi erittäin kauaksi tilastollisesta merkitsevyydestä. Väärän johtopäätöksen riski on korkea, joten esitetään, että poikkeavan parin esittämistä ei seurannut MMN-vastetta. Tulosten perusteella kuulojärjestelmä ei pystynyt rekisteröimään poikkeavia pareja vakioparien joukosta, koska tilastollisesti merkitsevää MMN-vastetta ei esiintynyt.

Koetilanteen C tulos on ristiriidassa aikaisempien tulosten kanssa, joita on saatu osittain samanlaisista koetilanteista (ks. Paavilainen ym., 1995; Paavilainen ym., 2018). Tässä tapauksessa tulosten tilastollisen merkitsevyyden puutetta ei voi selittää sillä, että otoskoko olisi ollut liian pieni. Jännitevasteissa matalan virran poikkeaville pareille ei näy visuaalisesti tarkasteltaessa mitään MMN-vasteeseen viittaavaa (kuva 7).

Paavilaisen ym. (2018) tulosten mukaan kuulojärjestelmä pystyy rekisteröimään suunnaltaan poikkeavat parit myös silloin, kun kahdessa eri virrassa olevien parien muutossuuntiin liittyvät abstraktit säännöt ovat keskenään ristiriitaiset. Koska tämän tutkimuksen tulokset ovat ristiriidassa Paavilaisen ym. (2018) tulosten kanssa, voidaan esittää, että kyseisessä tutkimuksessa tapahtunut äänivirtojen eriytyminen havainnon tasolla kahdeksi eri virraksi helpottaa kuulojärjestelmän työtä. Tämä mahdollisesti siksi, koska äänivirtojen eriytyminen voi olla oleellinen temporaalinen vihje siitä, että eri korkuiset parit kuuluvat eri kokonaisuuksiin.

Paavilaisen ym. (1995) kokeessa korkean ja matalan virran parien säännöt olivat keskenään vastakkaiset ja parit esitettiin satunnaisessa järjestyksessä. Molempien virtojen poikkeavien parien esittämistä seurasi MMN-vaste. Paavilaisen ym. (1995) kokeessa eri virtojen parit esitettiin kuitenkin eri korviin kun taas tässä kokeessa molempien virtojen parit esitettiin molempiin korviin. Tämä mahdollisesti selittää tulosten ristiriitaisuuden. Paavilainen ym. (1995) kokeessa eri korkuisten parien esittäminen eri korviin johti siihen, että eri korkuiset parit käsiteltiin ainakin osittain eri aivopuoliskoissa. Tässä tutkimuksessa kuulojärjestelmä joutui sen sijaan tekemään eri korkuisten virtojen erottelun ilman spatiaalisia vihjeitä eikä eri virtojen käsittely eri aivopuoliskoissa ollut mahdollista.

Koetilanteessa D esitettiin vuorotellen nousevia ja laskevia pareja, jotka oli satunnaisesti valittu jommasta kummasta virrasta. Poikkeava tapahtuma oli samansuuntaisen parin esiintyminen kahdesti peräkkäin. Koetilanteen D koeasetelmaa muistuttavaa asetelmaa ei ole aikaisemmin MMN-vasteeseen liittyvissä tutkimuksissa käytetty. Siksi tästä koetilanteesta saatuja tuloksia ei myöskään voida verrata mihinkään aikaisempiin tutkimuksiin. Tässä koetilanteessa kuulojärjestelmän piti rekisteröidä, että nousevat ja laskevat parit esiintyivät vuorotellen. Säännön löytämisen kannalta oli siis oleellista, että kuulojärjestelmä pystyy erottamaan sekä parin sisäisen muutoksen suunnan että parien esitysjärjestykseen liittyvän säännön. Sen sijaan virralla, johon pari kuului, ei ollut säännön löytämisen kannalta merkitystä.

Matalan virran poikkeavien parien jännitevaste oli aikavälillä, jossa MMN-vasteen oletettiin esiintyvän, amplitudiltaan negatiivisempi kuin matalan virran vakioerien (kuva 8). Korkean virran vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteissa ei näyttänyt olevan eroa. Vakio- ja poikkeavien parien jännitevasteiden keskiarvoamplitudien erotus jäi kauaksi tilastollisesta merkitsevyydestä. Parittaiset vertailut eivät myöskään tuottaneet tilastollisesti merkitseviä tuloksia. Tässäkin koetilanteessa MMN-vasteen esiintymisestä oli jännitevasteista (kuva 8) havaittavissa viitteitä. Kokonaisuutena arvioiden tämä näyttöä ei voida kuitenkaan pitää riittävänä, etenkin koska parin tyypin päävaikutus oli erittäin kaukana tilastollisesti merkitsevästä. Siksi myös tämän koetilanteen tuloksien perusteella esitetään, että MMN-vastetta ei poikkeavan parin esittämisen seurauksena esiintynyt. Tässäkään koetilanteessa kuulojärjestelmä ei pystynyt rekisteröimään poikkeavaa tapahtumaa, joka oli samansuuntaisen parin esiintyminen kahdesti peräkkäin. Tilastollisesti merkitsevän tuloksen puutetta ei voi tässäkin koetilanteessa selittää otoksen koolla. Parin tyypin päävaikutus oli siinä määrin kaukana tilastollisesta merkitsevyydestä, että olisi tarvittu mahdollisesti satoja koehenkilöitä tilastollisesti merkitsevien tulosten saamiseksi.

Nykyään vallitsevan käsityksen (Winkler, 2007) mukaan MMN-vasteen taustalla on kuulojärjestelmän hermostollinen mekanismi, joka tallentaa muistiin ennustemallin ympäristön äänien fysikaalisista tai abstrakteista säännöistä, sekä rekisteröi tämän mallin ennusteita rikkovat poikkeavat tapahtumat. Kuten jokainen toiminto, jota ihmisäivot suorittavat, myös MMN-vasteen taustalla olevan hermostollisen mekanismin on oltava suorituskyvyltään rajallinen. Esimerkiksi MMN-vastetta ei enää esiinny, kun yksinkertaisessa oddball-kokeessa vakioääni on korkeudeltaan 1000 Hz ja poikkeava ääni on 1002 Hz. Tämä on yksi selvä osoitus kuulojärjestelmän rajoista.

Kun ympäristön äänien säännöt liittyvät vain yksinkertaisiin fysikaalisiin ominaisuuksiin, on erilaiset koetilanteet helppo asettaa vaikeusjärjestykseen. Kun erilaisten äänien fysikaaliset erot ovat matemaattisesti määriteltävissä, ne ovat asetettavissa yksiselitteiseen hierarkiseen järjestykseen.

1002 Hz:n korkuinen ääni on vaikeampi erottaa 1000 Hz:n äänestä kuin 1004 Hz:n ääni. Kun esitettyjen äänien säännöt ovat luonteeltaan jotain abstraktimpaa, on koetilanteita usein mahdotonta asettaa yksiselitteiseen hierarkiseen järjestykseen. Siksi voidaan ainoastaan logiikalla ja tutkimustuloksilla yrittää perustella, miksi koetilanteet olisivat tässä kokeessa toisiaan vaikeampia.

Koetilanne A oletettiin helpoimmaksi, koska siinä vain parien esitysjärjestys oli säännön kannalta oleellinen tekijä. Koetilanteet B ja C oletettiin vaikeammaksi kuin A, koska näissä oleellinen tekijä oli parin sisäinen muutos. Koetilanne C oletettiin koetilannetta B vaikeammaksi, koska siinä eri korkeuden virtojen säännöt olivat vastakkaiset. Koetilanne D oletettiin vaikeimmaksi, koska siinä oli oleellista sekä parin sisäisen muutoksen suunta että esitysjärjestys. Tulosten perusteella voidaan esittää tukea sille, että oletus koetilanteiden vaikeusjärjestyksestä oli määritelty oikein.

Poikkeavien- ja vakioparien vasteiden välillä olevien erojen suuruus pieneni koetilanteiden vaikeusjärjestyksen mukaan (taulukko 1). Myös parin tyypin päävaikutuksen tilastollinen merkitsevyys heikkeni koetilanteiden oletetun vaikeusjärjestyksen mukaisesti.

Tulosten tilastollisen analyysin perusteella ainoastaan koetilanteessa A saatiin jonkinlaista näyttöä MMN-vasteesta. Koetilanteissa B, C ja D taas ei, joskin visuaalisesti tuloksia tarkasteltaessa tästä oli viitteitä. Tästä syystä voidaan esittää, että kuulojärjestelmä on selvästi rajoittunut myös siinä, miten tehokkaasti ja tarkasti se pystyy rekisteröimään abstraktia sääntöä rikkovat poikkeavat äänet vakioäänien joukosta. Kun abstrakti sääntö muuttuu liian monimutkaiseksi, MMN-vasteen taustalla oleva hermostollinen mekanismi ei enää joko toimi lainkaan tai ainakin huomattavalla epävarmuudella. Monissa aiemmissa tutkimuksissa selkeä MMN-vaste on esiintynyt varsin monimutkaisiakin abstrakteja sääntöjä rikkoville äänille (katsaus: Paavilainen, 2013). Tästä syystä on erittäin perusteltua etsiä vielä syitä, jotka mahdollisesti antaisivat selityksen MMN-vasteen puuttumiselle tämän tutkimuksen useimmissa koetilanteissa.

4.2 Tulosten tulkinnalliset ongelmat

Suurimmassa osassa eri koetilanteiden tuloksista poikkeavien parien jännitevaste oli MMN-vasteen tyypillisellä esiintymislatussilla voimakkuudeltaan vakioparien jännitevastetta negatiivisempi. Ilmiötä ei ollut havaittavissa koetilanteessa C matalassa virrassa ja koetilanteessa D korkeassa virrassa. Tilastollisten testien tuloksien perusteella tämä vasteissa näkyvä ilmiö saattoi olla kuitenkin koetilanteissa B, C ja D vain satunnainen löydös. Jos tilastollisia merkitsevyyksiä tulkitaan konservatiivisesti ($p < 0,05$), poikkeavat parit eivät synnyttäneet missään koetilanteessa MMN-vastetta. Koetilanteessa A tulokset ovat kuitenkin siinä määrin lähellä tilastollisesti

merkitseviä, että tulkintaan MMN-vasteen esiintymisestä ei sisälly kohtuutonta väärän tulkinnan riskiä.

On mahdollista, että koetilanteet B, C ja D todella olivat kuulojärjestelmälle liian haastavia, jonka seurauksena MMN-vasteet joko niissä puuttuivat kokonaan tai jäivät amplitudiltaan hyvin pieniksi ja tilastollisesti ei-merkitseviksi. On myös mahdollista, että tämän tutkimuksen tilastolliset analyysimenetelmät poikkesivat jollain merkittäväällä tavalla aikaisemmista tutkimuksista, jonka seurauksena myös tulokset poikkeavat aikaisemmista tutkimuksista. Siksi on oleellista selvittää, ovatko analyysimenetelmät tuottaneet ristiriidan tämän ja aikaisempien tutkimustulosten välille.

Lisäksi on myös mahdollista, että tutkimuksen otoskoko olisi ollut liian pieni. Koetilanteen A tulos olisi ollut helposti tilastollisesti merkitsevä muutaman koehenkilön lisäämisellä (olettaen, että lisättyjen koehenkilöiden tulokset olisivat linjassa aikaisemmin mitattujen kanssa). Toisaalta koetilanteiden C ja D tulokset olivat siinä määrin kaukana tilastollisesti merkitsevästä, että niiden saaminen tilastollisesti merkitseviksi vaatisi usean kymmenen koehenkilön lisäämistä otokseen.

Tässä tutkimuksessa MMN-vasteen keskiarvoamplitudin laskentaväli tilastollisiin analyyseihin päätettiin etukäteen, aikaisempien tutkimusten (katsaus: Paavilainen, 2013) tulosten perusteella, eli ennen koehenkilöiden yli keskiarvoistettujen jännitevasteiden näkemistä. Jos laskentaväli olisi päätetty jännitevasteiden näkemisen jälkeen, olisi mahdollisesti päädytty eri laskentaväliin, jonka seurauksena olisi ehkä saatu enemmän tilastollisesti merkitseviä tuloksia. Luckin ja Gaspelin (2017) mukaan jännitevasteiden keskiarvoamplitudien laskentavälin määrittäminen vasta koehenkilöiden yli keskiarvoistettujen jännitevasteiden näkemisen jälkeen on valitettavan yleinen käytäntö. Tällä tavoin voidaan löytää tuloksia, jotka ovat tilastollisesti merkitseviä, mutta eivät toistu myöhemmissä kokeissa.

Luck ja Gaspelin (2017) osoittivat, että jännitevastetutkimuksen datasta voidaan täysin satunnaisella datan kahteen osaan jakamisella ja valitsemalla jännitevasteen keskiarvoamplitudin laskentaväli sopivasti silmämääräisen tarkastelun perusteella saada näennäisesti ”tilastollisesti merkitseviä” tuloksia. Tämä johtuu siitä, että jännitevastetutkimuksien datassa on usein tuhansia datapisteitä ja niiden varianssi on suuri. Tämä herättää kysymyksen siitä, ovatko tilastolliset merkitsevyydet paras tapa määrittää, onko jokin ero jännitevasteissa todella olemassa oleva ilmiö vai satunnainen löydös? Voidaan myös kysyä, onko abstraktin poikkeaman synnyttämä MMN-vaste todella niin hyvin toistuva ilmiö kuin aikaisempien tutkimusten (katsaus: Paavilainen, 2013) pohjalta voisi olettaa? Tämän kysymyksen kannalta aiempien tutkimusten tarkat replikaatiot olisivat valaisevia.

Tällä tutkimuksella on muutamia rajoitteita, jotka on hyvä ottaa huomioon tuloksia tulkittaessa. Tässä tutkimuksessa ei ollut koetilannetta, jossa koehenkilöiden olisi pitänyt tarkkailla esitettäviä äänipareja ja tunnistaa poikkeavat parit. Tästä johtuen oletukselle koetilanteiden vaikeusjärjestyksestä ei ole todisteita, esimerkiksi tunnistusprosenttien muodossa. Tällaisen datan saaminen olisi kuitenkin ollut käytännössä vaikeaa. Usein koehenkilöt eivät pysty tietoisesti tunnistamaan abstraktia sääntöä rikkovia ärsykeitä kovinkaan tarkasti (ks. esim. Paavilainen ym. 1995). Lisäksi tarkkailutilanteen lisääminen kokeeseen olisi tehnyt siitä erittäin pitkän ja raskaan koehenkilöille.

Koetilanteita B ja C ei oltu toteutettu ehkä optimaalisimmalla mahdollisella tavalla. MMN-vaste on seurausta siitä, että jokin ääni poikkeaa jollain tavalla jostain toisesta äänestä tai äänistä, joita kuulojärjestelmä pitää ympäristön vakiona tai vakioina. Puhtain mahdollinen MMN-vaste saadaan eristettyä ns. Hillyardin periaatteen (Luck, 2014) mukaisesti esittämällä sama ärsyke kahdessa eri kontekstissa, sellaisessa, jossa se on vakioärsyke ja sellaisessa, jossa se on poikkeava ärsyke. Luotettavin MMN-vaste olisi näiden koetilanteiden jännitevasteiden erotus samalle ärsykkeelle. Jatkotutkimuksissa tätä periaatetta olisi hyvä noudattaa aina kun mahdollista. Jatkotutkimuksissa olisi myös entistä paremmin syytä kiinnittää huomiota edellä esitettyihin kysymyksiin.

Lähteet

Bonetti, L., Haumann, N., Vuust, P., Kliuchko, M. & Brattico, E. (2017). Risk of depression enhances auditory pitch discrimination in the brain as indexed by the mismatch negativity. *Clinical Neurophysiology*, 128(10), 1923-1936.

Bonetti, L., Haumann, N., Brattico, E., Kliuchko, M., Vuust, P., Särkämö, T. & Näätänen, R. (2018). Auditory sensory memory and working memory skills: Association between frontal MMN and performance scores. *Brain Research*, 1700, 86-98.

Carral, V., Corral, M. & Escera, C. (2005). Auditory event-related potentials as a function of abstract change magnitude. *NeuroReport*, 16(3), 301-305.

Darwin, C. (1997). Auditory grouping. *Trends in Cognitive Sciences*, 1(9), 327-333.

De Pascalis, V., Varriale, E., Fulco, M. & Fracasso, F. (2014). Mental ability and information processing during discrimination of auditory motion patterns: Effects on P300 and mismatch negativity. *Intelligence*, 47, 93-106.

- Deacon, D., Gomes, H., Manette Nousak, J., Ritter, W. & Javitt, D. (2000). Effect of frequency separation and stimulus rate on the mismatch negativity: an examination of the issue of refractoriness in humans. *Neuroscience Letters*, 287 (2000), 167-170.
- Fishman, Y. (2014). The Mechanisms and Meaning of the Mismatch Negativity. *Brain Topography*, 27(4), 500-526.
- Ford, J. M. & Hillyard, S. A. (1981). Event-Related Potentials (ERPs) to Interruptions of a Steady Rhythm. *Psychophysiology*, 18(3), 322-330.
- Franken, I. H., Nijs, I. & Van Strien, J. W. (2005). Impulsivity affects mismatch negativity (MMN) measures of preattentive auditory processing. *Biological Psychology*, 70(3), 161-167.'
- Ge, Y., Wu, J., Sun, X. & Zhang, K. (2011). Enhanced mismatch negativity in adolescents with posttraumatic stress disorder (PTSD). *International Journal of Psychophysiology*, 79(2), 231-235.
- Hari, R., Hämäläinen, M., Ilmoniemi, R., Kaukoranta, E., Reinikainen, K. & Salminen, J. (1984). Responses of the primary auditory cortex to pitch changes in a sequence of tone pips: neuromagnetic recordings in man. *Neuroscience Letters*, 50 (1984), 127-132.
- Hermens, D. F., Chitty, K. M. & Kaur, M. (2018). Mismatch negativity in bipolar disorder: A neurophysiological biomarker of intermediate effect? *Schizophrenia Research*, 191, 132-139.
- Houlihan, M. & Stelmack, R. M. (2012). Mental ability and mismatch negativity: Pre-attentive discrimination of abstract feature conjunctions in auditory sequences. *Intelligence*, 40(3), 239-244.
- Koshiyama, D., Kirihara, K., Tada, M., Nagai, T., Fujioka, M., Koike, S., Kasai, K. (2018). Association between mismatch negativity and global functioning is specific to duration deviance in early stages of psychosis. *Schizophrenia Research*, 195, 378-384.
- Luck, S. J. K. (2014). *An introduction to the event-related potential technique* (Second edition.). Cambridge, Massachusetts: The MIT Press.
- Luck, S. J. & Gaspelin, N. (2017). How to get statistically significant effects in any ERP experiment (and why you shouldn't). *Psychophysiology*, 54(1), 146-157.
- May, P. J. C. (1999). Memory traces in human auditory cortex. *Tohtorin väitöskirja, Lontoon yliopisto*, UK.
- Nordby, H., Roth, W. & Pfefferbaum, A. (1988). Event-related potentials to breaks in sequences of alternating pitches or interstimulus intervals. *Psychophysiology*, 25(3), 262-268.

- Näätänen, R., Gaillard, A. W. K. & Mäntysalo, S. (1978). Early selective-attention effect on evoked potential reinterpreted. *Acta Psychologica*, 42(4), 313-329.
- Näätänen, R., Simpson, M. & Loveless, N. E. (1982). Stimulus deviance and evoked potentials. *Biological Psychology*, 14(1982), 53-98.
- Näätänen, R., Paavilainen, P. & Reinikainen, K. (1989). Do event-related potentials to infrequent decrements in duration of auditory stimuli demonstrate a memory trace in man? *Neuroscience Letters*, 107(1989), 347-352.
- Näätänen, R. (1990). The role of attention in auditory information processing as revealed by event related potentials and other brain measures of cognitive function. *Behavioral and Brain Sciences*, 13(2), 201-233.
- Näätänen, R. & Escera, C. (2000). Mismatch Negativity: Clinical and Other Applications. *Audiology and Neurotology*, 5(3-4), 105-110.
- Näätänen, R., Tervaniemi, M., Sussman, E., Paavilainen, P. & Winkler, I. (2001). Primitive intelligence in the auditory cortex. *Trends in Neurosciences*, 24(5), 283-288.
- Näätänen, R., Paavilainen P., Rinne, T. & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, 118(12), 2544-2590.
- Paavilainen, P., Karlsson, M., Reinikainen, K. & Näätänen, R. (1989). Mismatch negativity to changes in the spatial location of an auditory stimulus. *International Journal of Psychophysiology*, 7(2-4), 342-343.
- Paavilainen, P., Saarinen, J., Tervaniemi, M. & Näätänen, R. (1995). Mismatch negativity to changes in abstract sound features during dichotic listening. *Journal of Psychophysiology*, 9(3), 243-249.
- Paavilainen, P., Jamarillo, M. & Näätänen, R. (1998). Binaural information can converge in abstract memory traces. *Psychophysiology*, 35(5), 483-487.
- Paavilainen, P., Jaramillo, M., Näätänen, R. & Winkler, I. (1999). Neuronal populations in the human brain extracting invariant relationships from acoustic variance. *Neuroscience Letters*, 265(3), 179-182.

- Paavilainen, P., Simola, J., Jaramillo, M., Näätänen, R. & Winkler, I. (2001). Preattentive extraction of abstract feature conjunctions from auditory stimulation as reflected by the mismatch negativity (MMN). *Psychophysiology*, 38(2), 359-365.
- Paavilainen, P., Degerman, A., Takegata, R. & Winkler, I. (2003). Spectral and temporal stimulus characteristics in the processing of abstract auditory features. *NeuroReport*, 14(5), 715-718.
- Paavilainen, P., Arajärvi, P. & Takegata, R. (2007). Preattentive detection of nonsalient contingencies between auditory features. *NeuroReport*, 18(2), 159-163.
- Paavilainen, P. (2013). The mismatch-negativity (MMN) component of the auditory event-related potential to violations of abstract regularities: A review. *International journal of psychophysiology*, 88(2), 109-123.
- Paavilainen, P., Kaukinen, C., Koskinen, O., Kylmälä, J., Rehn, L. (2018) Mismatch negativity (MMN) elicited by abstract regularity violations in two concurrent auditory streams. *Heliyon*, 4(4).
- Rossetti, O., Tzovara, M., Murray, M., De Lucia, M. & Oddo, M. (2014). Automated Auditory Mismatch Negativity Paradigm Improves Coma Prognostic Accuracy After Cardiac Arrest and Therapeutic Hypothermia. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 31(4), 356-361.
- Saarinen, J., Paavilainen P., Schröger, E., Tervaniemi, M. & Näätänen, R. (1992). Representation of abstract attributes of auditory stimuli in the human brain. *NeuroReport*, 3(12), 1149-1151.
- Sams, M., Paavilainen, P., Alho, K. & Näätänen, R. (1985). Auditory frequency discrimination and event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 62(6), 437-448.
- Sams, M. & Näätänen, R. (1991). Neuromagnetic responses of the human auditory cortex to short frequency glides. *Neuroscience Letters*, 121(1-2), 43-46.
- Stothart, G., Kazanina, N., Tales, A. & Naatanen, R. (2014). Early visual evoked potentials and mismatch negativity in Alzheimer's disease and Mild Cognitive Impairment: Cross-sectional findings and longitudinal follow-up. *International Journal of Psychophysiology*, 94(2), 156.
- Sussman, E., Ritter, W. & Vaughan H. G. (1998) Attention affects the organization of auditory input associated with the mismatch negativity system. *Brain Res*, 789, 130-138.
- Sussman, E. (2007). A new view on the MMN and attention debate. *Journal of Psychophysiology*, 21(3-4), 164-175.

- Squires, N. K., Squires, K. C. & Hillyard, S. A. (1975). Two varieties of long-latency positive waves evoked by unpredictable auditory stimuli in man. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 38(4), 387-401.
- Tervaniemi, M., Maury, S. & Näätänen, R. (1994). Neural representations of abstract stimulus features in the human brain as reflected by the mismatch negativity. *NeuroReport*, 5(7), 844-846.
- Tervaniemi, M., Rytkönen, M., R. Schröger, E., Ilmoniemi, R. & Näätänen, R. Schröger, E., (2001). Superior formation of cortical memory traces for melodic patterns in musicians. *Learning and Memory*, 8(5), 295-300.
- Tiitinen, H., May, P., Reinikainen, K. & Näätänen, R. (1994). Attentive novelty detection in humans is governed by pre-attentive sensory memory. *Nature*, 372(6501), 90-92.
- Woldorff, M. G., Hillyard, S. A., Gallen, C. C., Hampson, S. R. & Bloom, F. E. (1998). Magnetoencephalographic recordings demonstrate attentional modulation of mismatch-related neural activity in human auditory cortex. *Psychophysiology*, 35(3), 283-292.